

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO
EM GEOGRAFIA

MÁRCIA CRISTINA DA CUNHA

TESE DE DOUTORADO
PROCESSOS HIDROLÓGICOS SUBSUPERFICIAIS INFLUENCIADOS POR
CORTES DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

CURITIBA

2016

MÁRCIA CRISTINA DA CUNHA

TESE DE DOUTORADO
PROCESSOS HIDROLÓGICOS SUBSUPERFICIAIS INFLUENCIADOS POR
CORTES DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, curso de Doutorado, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná-UFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Geografia.

Orientação: Prof. Dr. Fabiano Antonio de Oliveira

Co-orientação: Prof. Dr. Edivaldo Lopes Thomaz

CURITIBA

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

C972p

Cunha, Márcia Cristina da

Processos hidrológicos subsuperficiais influenciados por cortes de estradas não pavimentadas/ Márcia Cristina da Cunha. – Curitiba, 2016.
115 f. : il. color. ; 30 cm.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra,
Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2016.

Orientador: Fabiano Antonio de Oliveira – Co-orientador: Edivaldo
Lopes Thomaz.

Bibliografia: p. 104-109.

1. Hidrogeologia. 2. Geomorfologia. 3. Água do solo - Escoamento.
4. Água - Conservação. 5. Solo - Conservação. I. Universidade Federal
do Paraná. II. Oliveira, Fabiano Antonio de. III. Thomaz, Edivaldo Lopes.
IV. Título.

CDD: 551.49



MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR CIÊNCIAS DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



PARECER

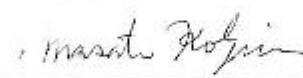
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Geografia reuniram-se para a arguição da Tese de Doutorado, apresentada pelo (a) candidato (a) **MÁRCIA CRISTINA DA CUNHA** intitulada "**PROCESSOS HIDROLÓGICOS SUBSUPERFICIAIS INFLUENCIADOS POR CORTES DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS**", para obtenção do grau de Doutora em Geografia, do Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná Área de Concentração **Espaço, Sociedade e Ambiente**, Linha de Pesquisa Paisagem e Análise Ambiental.

Após haver analisado o referido trabalho e arguido o (a) candidato (a), são de parecer pela aprovação da Tese.

Curitiba, 22 de março de 2016.

Nome e Assinatura da Banca Examinadora:


Prof. Dr. Fabiano Antônio de Oliveira - orientador


Prof. Dr. Masato Kobiyama - IPH/UFRRS


Dr. Monica Lopes Gonçalves - UDESC


Prof. Dr. Leandro Vestena - UNICENTRO


Prof. Dr. Eduardo Vedor de Paula - PPGGEO/UFPR

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese a minha companheira Mariane Mártire Bossoni por me apoiar durante toda essa caminhada, estar ao meu lado nos momentos bons e ruins e, principalmente, por contribuir com todos os trabalhos de campo realizados. Aos meus pais Gercindo e Maria e meus irmãos Emerson e Marli que sempre me apoiaram e me incentivaram mesmo não sabendo ao certo o verdadeiro significado do trabalho realizado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me conceder o dom da vida e por me dar forças, principalmente nos momentos de fraqueza.

Um agradecimento especial ao professor Dr. Fabiano Antonio de Oliveira pela orientação e por acreditar no trabalho que seria desenvolvido. Por estar presente nos momentos solicitados e por sempre se importar, antes de mais nada, com minha pessoa.

Agradeço também de forma especial ao professor Dr. Edivaldo Lopes Thomaz pela co-orientação e, principalmente, pela compreensão e paciência que teve no desenvolvimento desta pesquisa. Já se passaram nove anos desde o início do primeiro trabalho realizado em conjunto com o professor Edivaldo, e ao longo dessa caminhada só tenho a agradecer por todo conhecimento adquirido e a amizade fortalecida.

Agradeço aos colegas de laboratórios Edivaldo Geffer, Rafael de Castro e ao professor Dr. Glauco Negrão por me ajudarem com as instalações dos equipamentos necessários ao monitoramento. Não posso deixar de agradecer ao laboratório de erosão dos solos da Unicentro, sob a responsabilidade do professor Dr. Edivaldo Lopes Thomaz, que sempre esteve disponível para ao longo da pesquisa.

Um agradecimento muito especial os proprietários da comunidade do Guabiroba: João, Maurício, Márcio, Tico e Joel por permitirem as instalações e monitoramento dos equipamentos em suas propriedades para realização da pesquisa.

Agradeço também a todos os professores do departamento de Geografia- Unicentro campus CEDETEG- que me apoiaram de forma direta ou indireta no desenvolvimento desta pesquisa.

Não poderia de deixar de agradecer aos meus alunos que sempre compreenderam minhas ausências e falhas como professora, que em muitos casos, foram reflexos das atividades relacionadas ao doutorado.

Um agradecimento especial aos colegas da UFPR que fiz durante essa caminhada e, também, à secretária Adriana e ao Luiz Zem que sempre estiveram dispostos a tirar minhas dúvidas. Agradeço também à CAPES, pelo apoio financeiro.

Agradeço a compreensão dos meus amigos mais próximos por entenderem, muitas vezes, minha ausência em suas vidas em função do doutorado.

Por fim agradeço a todas as pessoas que contribuíram com energias positivas para realização deste trabalho. À todos meu muito obrigada.

No começo tudo parece difícil, uma estrada cheia de obstáculos e espinhos, mas aos poucos, uma luz, ainda que tímida, começa a aparecer. O preto no branco começa a dar espaço ao novo colorido. O mais difícil não é iniciar o trabalho, mas sim dar continuidade. O importante, acima de tudo, é que mesmo com todas as dificuldades enfrentadas, sempre há recompensa, ainda que nem sempre seja reconhecida. Tropeçar, chorar, cair, levantar, faz parte dessa caminhada, mas desistir jamais. O reconhecimento da ajuda sempre necessária é primordial, até porque a felicidade só é válida quando é compartilhada. E no final do caminho percebemos que valeu a pena e, aos poucos, vamos entendendo que todos os obstáculos enfrentados serviram para mostrar que as cicatrizes adquiridas ao longo da caminhada são necessárias para tornar realidade os nossos sonhos e sempre seguir em frente, porque afinal só consegue vencer quem um dia teve a audácia de tentar.

(CUNHA, 2016)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	vii
SIGLAS UTILIZADAS NO TRABALHO.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
APRESENTAÇÃO DOS CAPÍTULOS	x
RESUMO.....	xii
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO	2
1.1 OBJETIVOS.....	5
1.1.1 Objetivo Geral	5
1.1.2 Objetivos específicos.....	5
2 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO GUABIROBA.....	7
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
3.1 ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	15
3.1.1 Elementos lineares presentes nas paisagens rurais	15
3.1.2 Características das estradas brasileiras	16
3.2 FLUXO SUBSUPERFICIAL.....	18
3.2.1 Propriedades dos fluxos subsuperficiais em bacias hidrográficas.....	18
3.3 INTERCEPTAÇÃO DO FLUXO SUBSUPERFICIAL POR ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS.....	22
3.3.1 Estradas não pavimentadas como elementos eficazes na conexão vertente x canal fluvial.....	22
4 MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
4.2 TRABALHO DE GABINETE	28
4.3 INVENTÁRIO PARA IDENTIFICAÇÃO E MONITORAMENTO DAS FORMAS DE INTERCEPTAÇÃO DO FLUXO SUBSUPERFICIAL.....	28
4.4 CLASSIFICAÇÃO DAS FORMAS DE INTERCEPTAÇÃO DO FLUXO SUBSUPERFICIAL POR ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	32
4.5 CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES HIDROGEOMORFOPEDOLÓGICAS (SETORES DA VERTENTE) NOS LOCAIS MONITORADOS	33

4.6 MONITORAMENTO DA PRECIPITAÇÃO (DURAÇÃO, INTENSIDADE E FREQUÊNCIA)	35
4.7 MONITORAMENTO DA VAZÃO MÁXIMA NOS PONTOS DE INTERCEPTAÇÃO DO FLUXO SUBSUPERFICIAL	38
4.8 MONITORAMENTO DA PROFUNDIDADE DO NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO A PARTIR DA SUPERFÍCIE DO SOLO NOS PONTOS DE INTERCEPTAÇÃO DO FLUXO SUBSUPERFICIAL POR ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS POR MEIO DE PIEZÔMETRO	42
4.9 RELAÇÃO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO, NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO E VAZÃO MÁXIMA EM CADA FORMA DE INTERCEPTAÇÃO DO FLUXO SUBSUPERFICIAL POR CORTES DA ESTRADA	45
5 RESULTADOS	47
5.1 CARACTERÍSTICAS DA REDE DE DRENAGEM E REDE VIÁRIA DA BACIA DO RIO GUABIROBA	47
5.2 CLASSIFICAÇÃO DAS FORMAS DE INTERCEPTAÇÃO DO FLUXO SUBSUPERFICIAL POR ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS NA BACIA DO RIO GUABIROBA	51
5.3 DISTRIBUIÇÃO E DINÂMICA DO FLUXO SUBSUPERFICIAL INTERCEPTADO POR ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	58
5.4 MONITORAMENTO DOS PONTOS DE INTERCEPTAÇÃO DO FLUXO SUBSUPERFICIAL POR ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	61
5.4.1 Características dos pontos monitorados	62
5.4.1.1 Ponto 1- Fluxo Subsuperficial de Retorno	62
5.4.1.2 Ponto 2- Fluxo Subsuperficial <i>Piping</i>	64
5.4.1.3 Ponto 3- Fluxo Subsuperficial Difuso	67
5.5 PRECIPITAÇÃO, VAZÃO MÁXIMA E NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO MONITORADOS	70
5.5.1 Precipitação	70
5.5.2 Variação da profundidade do nível do lençol freático nos locais monitorados	72
5.5.3 Monitoramento da vazão máxima em locais de interceptação de fluxo subsuperficial causado por cortes de estradas não pavimentadas	79
5.6 CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO, VAZÃO MÁXIMA E O NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO NOS TRÊS PONTOS MONITORADOS	85

5.6.1 Correlação entre precipitação e a profundidade do nível do lençol freático nos locais monitorados.....	85
5.6.2 Correlação entre precipitação e vazão máxima nos locais monitorados.	89
6 DISCUSSÕES	94
6.1 CONEXÃO VERTENTE E RIO POR MEIO DA INTERCEPTAÇÃO DO FLUXO SUBSUPERFICIAL CAUSADO POR CORTES DA ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS.....	94
6.2 RELAÇÃO CHUVA, VAZÃO MÁXIMA E A PROFUNDIDADE DO NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO NOS LOCAIS DE INTERCEPTAÇÃO DO FLUXO SUBSUPERFICIAL POR ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	96
7 CONCLUSÕES.....	102
8 REFERÊNCIAS	104
APÊNDICES	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização da bacia do Rio Guabiroba	7
Figura 2- Declividade da bacia do Rio Guabiroba	9
Figura 3- Formas do terreno da bacia do Rio Guabiroba	11
Figura 4- Uso da terra da bacia do Rio Guabiroba	13
Figura 5- Visão distribuída da geração de escoamento na vertente	20
Figura 6- Interceptação do fluxo subsuperficial por cortes da estrada	24
Figura 7- Esquema teórico empírico-cartográfico e de monitoramento	29
Figura 8- Localização dos três pontos monitorados	31
Figura 9- Características dos fluxos subsuperficiais interceptados por estradas não pavimentadas	32
Figura 10- Trado utilizado para coleta de solo	35
Figura 11- Pluviógrafos instalados na bacia do Rio Guabiroba	36
Figura 12- Localização dos pluviógrafos	37
Figura 13- Dinâmica do funcionamento das Calhas Parshall.....	39
Figura 14- Calhas instaladas para monitoramento da vazão máxima em estradas não pavimentadas na bacia do Rio Guabiroba	40
Figura 15- Localização de implantação das calhas	41
Figura 16- Instalação dos piezômetros para monitoramento do nível do lençol freático nos 3 pontos de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas ..	44
Figura 17- Rede drenagem e rede viária da bacia do Rio Guabiroba	48
Figura 18- Estradas não pavimentadas presentes na bacia do Rio Guabiroba	49
Figura 19- Atoleiro e pista escorregadia na bacia do Rio Guabiroba.....	50
Figura 20- Formas de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas	52
Figura 21- Perfil topográfico dos três locais de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes de estradas não pavimentadas	54
Figura 22- Unidades geomorfopedológicas, de acordo com o setor de vertente e a declividade de cada setor monitorado	55
Figura 23- Interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas não pavimentadas presente na bacia hidrográfica do Rio Guabiroba	56
Figura 24- Interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas não pavimentadas presente na bacia hidrográfica do Rio Guabiroba	57

Figura 25- Intercepção do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas não pavimentadas presente na bacia hidrográfica do Rio Guabiroba	57
Figura 26- Locais de intercepção do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas na bacia do Rio Guabiroba	59
Figura 27- Intercepção do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas	60
Figura 28- Recorte espacial das três formas de intercepção do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas na bacia do Rio Guabiroba.....	61
Figura 29- Localização dos pontos de monitoramento de intercepção do fluxo subsuperficial causado por estradas não pavimentadas-.....	61
Figura 30- Área saturada ocasionada com a intercepção do fluxo subsuperficial no ponto 1- Fluxo de Retorno.....	64
Figura 31- <i>Pipings</i> encontrados na bacia do Rio Guabiroba	65
Figura 32- Fluxo subsuperficial no ponto 2- <i>Piping</i>	66
Figura 33- Conexão do Fluxo no Ponto 2- <i>Piping</i> com o canal fluvial de 3ª ordem.....	67
Figura 34- Fluxo 3- Difuso.....	69
Figura 35- Total médio mensal de chuva registrada nos três pluviômetros com os respectivos desvio padrão de cada mês monitorado.....	70
Figura 36- Monitoramento do nível do lençol freático por meio de piezômetro no ponto 1- Fluxo de Retorno.....	72
Figura 37- Nível do lençol freático em cinco meses de monitoramento nos três locais de intercepção do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas	73
Figura 38- Profundidade do lençol freático avaliado nos dias 04, 18 e 24 de abril/2015, e respectiva cota do terreno	74
Figura 39- Profundidade do lençol freático avaliado nos dias 04, 18 e 24 de abril/2015, e respectiva cota do terreno	74
Figura 40- Profundidade do lençol freático avaliado nos dias 04, 18 e 24 de abril/2015, e respectiva cota do terreno	75
Figura 41- Profundidade do lençol freático avaliado nos dias 04, 18 e 24 de abril/2015, e respectiva cota do terreno	75
Figura 42- Profundidade do lençol freático avaliado nos dias 04, 18 e 24 de abril/2015, e respectiva cota do terreno	76
Figura 43- Resposta do nível do lençol freático em relação a precipitação nos três pontos monitorados	77

Figura 44- Média e valor mínimo e máximo do nível do lençol freático nos três pontos de monitoramento	79
Figura 45- Vazão máxima (L/s) registrada nos 12 meses de monitoramento no canal de 2ª ordem na bacia do Rio Guabiroba com o desvio padrão de cada mês	80
Figura 46- Vazão máxima (L/s) registrada nos 12 meses de monitoramento no ponto 1- Fluxo de Retorno na bacia do Rio Guabiroba com o desvio padrão de cada mês.....	80
Figura 47- Vazão máxima (L/s) registrada nos 12 meses de monitoramento no ponto 2- Fluxo <i>Piping</i> na bacia do Rio Guabiroba com o desvio padrão de cada mês.....	81
Figura 48- Vazão máxima (L/s) registrada nos 12 meses de monitoramento no ponto 3- Fluxo Difuso na bacia do Rio Guabiroba com o desvio padrão de cada mês	81
Figura 49- Soma total de vazão máxima (L/s) nos três pontos de monitoramento no período de um ano	82
Figura 50- Média e valor mínimo e máximo de vazão máxima nos três pontos de monitoramento.....	83
Figura 51- Resposta da vazão máxima em relação a precipitação nos três pontos monitorados	84
Figura 52- Correlação entre precipitação e o nível do lençol freático no ponto 1- Fluxo de Retorno	85
Figura 53- Correlação entre precipitação e o nível do lençol freático no ponto 2- Fluxo <i>Piping</i>	87
Figura 54- Correlação entre precipitação e o nível do lençol freático no ponto 3- Fluxo Difuso	88
Figura 55- Mudança no processo chuva-vazão máxima, monitorado no canal de 2ª ordem na bacia do Rio Guabiroba	89
Figura 56- Mudança no processo chuva-vazão máxima, monitorado no ponto 1- Fluxo de Retorno na bacia do Rio Guabiroba.....	90
Figura 57- Mudança no processo chuva-vazão máxima, monitorado no ponto 2- Fluxo <i>Piping</i> na bacia do Rio Guabiroba.....	90
Figura 58- Mudança no processo chuva-vazão máxima, monitorado no ponto 3- Fluxo Difuso na bacia do Rio Guabiroba	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Processos de fluxo numa bacia hidrográfica	17
Tabela 2- Tabela utilizada para exemplificar como os locais monitorados foram classificados.....	33
Tabela 3- Principais processos e efeitos observados para classificar as formas de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas	53
Tabela 4- Localização e características dos 20 locais de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes de estradas não pavimentadas.....	58
Tabela 5- Características físicas das amostras de solo no ponto 1- Fluxo de Retorno....	62
Tabela 6- Características físicas das amostras de solo no ponto 2- Fluxo <i>Piping</i>	65
Tabela 7- Características físicas das amostras de solo no ponto 3- Fluxo Difuso.....	68
Tabela 8- Distribuição da precipitação por classe, total acumulado em mm e participação no total da precipitação	70
Tabela 9- Distribuição dos eventos de chuva por intensidade	71
Tabela 10- Alteração Nível do nível do lençol freático nos três pontos monitorados.....	76
Tabela 11- Teste <i>Mann-Whitney</i> (0,05%) nos três pontos monitorados	78
Tabela 12- Contribuição média de vazão máxima em cada ponto monitorado.....	79
Tabela 13- Teste <i>Mann-Whitney</i> (0,05%) nos três pontos monitorados	83
Tabela 14- Máxima e mínima de chuva e vazão no período monitorado	91

SIGLAS UTILIZADAS NO TRABALHO

ANA- Agência Nacional de Águas

BRG- Bacia do Rio Guabiroba

CEDETEG- Centro de Desenvolvimento Educacional e Tecnológico de Guarapuava

DER- Departamento de Estrada e Rodagem

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

EMBRAPA- Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

INCONTROL- Manual de operação e instalação

PMG- Prefeitura Municipal de Guarapuava

PR- Paraná

PVC- *Polyvinyl chloride*

SAD- *Datum* da América do sul

SEMAFLOR- Secretaria Municipal do Meio Ambiente Desenvolvimento Florestal

SRTM- *Shuttle Radar Topography Mission*

TOPODATA- Dados Topográficos

UFPR- Universidade Federal do Paraná

UNICENTRO- Universidade Estadual do Centro Oeste do Paraná

UTM- Projeção Universal Transversa de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição
ha	Hectare
°C	Grau Celsius
>	Maior
<	Menor
mm	Milímetro
Lt	Comprimento total dos rios
%	Porcentagem
≥	Igual ou maior
m	Metro
cm	Centímetro
km	Quilômetro
g	Grama
ml	Mililitro
°	Grau
,	Minuto
”	Segundo
mm/h	Milímetro por hora
m ³ /h	Metro cúbico por hora
L/s	Litro por segundo
r	Coeficiente de Peason
km ²	Quilômetro quadrado
m ²	Metro quadrado
±	Desvio padrão

APRESENTAÇÃO DOS CAPÍTULOS

A tese desenvolvida está dividida em sete (7) capítulos e referências. A seguir, apresenta-se os assuntos abordados em cada capítulo:

CAPÍTULO 1- Neste capítulo é apresentado o panorama geral da pesquisa (introdução) que consiste na contextualização do tema a ser abordado e as atividades desenvolvidas. Trabalha os conceitos básicos de estradas não pavimentadas e fluxo subsuperficial. Esclarecem-se, nesta etapa, quais são as lacunas existentes em relação ao tema abordado e quais são os objetivos da pesquisa.

CAPÍTULO 2- Encontra-se a localização da área de estudo e a contextualização da área da pesquisa em seus aspectos físico-ambientais como, por exemplo, clima, tipo da cobertura superficial (solo), declividade, formas do terreno e uso da terra.

CAPÍTULO 3- É apresentada a fundamentação teórica que deu suporte à pesquisa. A primeira parte refere-se ao conceito de estradas não pavimentadas como elementos presentes nas paisagens rurais. A segunda parte aborda as características das estradas brasileiras, na sequência encontra-se o conceito de fluxo subsuperficial e suas propriedades e na última parte deste capítulo destaca-se a interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas não pavimentadas.

CAPÍTULO 4- São descritos, de modo detalhado, os procedimentos operacionais que envolveram os trabalhos de campo. Nessa etapa estão também descritos todos os procedimentos metodológicos e os materiais utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

CAPÍTULO 5- São apresentados os resultados da pesquisa. Os primeiros resultados referem-se às características da rede de drenagem e rede viária da área de estudo. Na sequência, tem-se a classificação das formas de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes da estrada, posteriormente, encontra-se a interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas. A parte seguinte trata do monitoramento das três formas de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas e, em seguida, é feita a caracterização dos três setores da vertente, seguindo pela apresentação dos volumes de chuva, nível do lençol freático e vazão máxima. E por último tem-se a explicação da relação entre os volumes encontrados de chuva, nível do lençol freático e vazão máxima.

CAPÍTULO 6- É apresentada a discussão dos resultados obtidos com a literatura consultada. Na primeira parte faz-se uma discussão em relação à conexão vertente e rio por meio da interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas não pavimentadas e, na sequência, tem-se a discussão sobre a relação dos volumes de chuva, nível do lençol freático e vazão máxima nos pontos de monitoramento.

CAPÍTULO 7- Nesse último capítulo encontra-se a conclusão do trabalho e uma breve avaliação de pertinência e contribuição para o meio científico.

RESUMO

As estradas não pavimentadas causam a interceptação do fluxo subsuperficial alterando a dinâmica hidrogeomorfológica natural da bacia hidrográfica. Os estudos de interesse quantitativo em relação aos processos geomorfológicos, principalmente produção de sedimentos em estradas não pavimentadas, vem aumentando significativamente. Porém, estudos relacionados às formas de interceptação do fluxo subsuperficial por estas estradas e a contribuição da vazão no rio com o fluxo subsuperficial interceptado ainda é escasso. A identificação, classificação e o monitoramento das formas da interceptação do fluxo subsuperficial podem auxiliar na compreensão dos problemas ambientais decorrentes dessa interceptação. Portanto, o presente estudo teve por objetivo compreender os mecanismos de funcionamento dos processos subsuperficiais que ocorrem em áreas que são interceptadas por cortes de estradas não pavimentadas na bacia do Rio Guabiroba, Guarapuava-PR. Os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa envolveram diversos trabalhos de campo (observação direta), como: identificação e caracterização preliminar das formas de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas não pavimentadas; classificação das formas de interceptação do fluxo subsuperficial; escolha dos locais para monitoramento; monitoramento dos processos hidrogeomorfológicos presentes nas formas de interceptação do fluxo subsuperficial; monitoramento dos volumes de chuva, nível do lençol freático e vazão máxima nos locais de interceptação e, por último, a análise dos dados obtidos. Por meio das análises realizadas nos dados registrados e associadas à observação direta em campo, foi observado um total de 20 pontos (locais) de interceptação do fluxo subsuperficial. Contudo, foram identificadas basicamente três formas de interceptação do fluxo subsuperficial. As formas foram classificadas como: 1- Fluxo de Retorno, 2- Fluxo *Piping* e 3- Fluxo Difuso. Foi possível monitorar três locais com esses três processos distintos. O ponto 1- Fluxo de Retorno foi absoluto em apresentar-se em fundo de vale e áreas úmidas, o ponto 2- Fluxo *Piping* prevaleceu nos setores de média vertente e o ponto 3- Fluxo Difuso esteve presente nos setores de alta vertente, exfiltrando o fluxo subsuperficial interceptado em cortes profundo do talude da estrada. Foi notado que os volumes de vazão máxima e o nível do lençol freático responderam de forma positiva em relação à chuva nos três locais monitorados. Porém, a vazão máxima respondeu de forma mais expressiva em relação à chuva no ponto 2- Fluxo *Piping*, e o nível do lençol freático respondeu de forma mais positiva e forte em relação à chuva no ponto 1- Fluxo de Retorno. Conclui-se, portanto, que as estradas não pavimentadas presentes na bacia do Rio Guabiroba são elementos essenciais na conexão vertente e rio e que importantes volumes de água tomam um sentido preferencial com relação ao sistema restante, produzindo um tempo de resposta bem menor que por meio da infiltração e deslocamento em subsuperfície. São interconectados, então, de forma rápida, vertente e rio, mudando a resposta hidrogeomorfológica natural da bacia ou da vertente.

Palavras-chave: processos hidrogeomorfológicos, formas de interceptação, monitoramento, conservação de água e solo.

ABSTRACT

No paved roads precipitate the interception of subsurface flow and it changes the natural hidrogeomorphological dynamic of the watershed. There is the substantial increase of quantitative studies regarding geomorphological processes especially around the production of sediments from no paved roads. However, some studies regarding forms of interception of subsurface flow by this kind of roads and the contribution of leaking in river with the intercepted subsurface flow is still limited. Forms of identification, classification and monitoring of interception of subsurface flow are able to help the understanding of environment problems caused by this interception. So the objective of this study was to understand functioning mechanisms of subsurface processes that occur in areas that are intercepted by no paved roads cuts on Guabiroba River basin in Guarapuava, Paraná, Brazil. Methodological procedures in this research involved different fieldworks (direct observation) as: identification and preliminary characterization of the kinds of interception of subsurface flow caused by no paved roads cuts; classification of interception of subsurface flow; selection of places for monitoring; monitoring of hidrogeomorphological processes into kinds of interception of subsurface flow; monitoring of the volume of rain, level of water table and peak flow on places of interception and finally the analysis of data. Analysis of listed data and direct observation on field was that the total of 20 points (places) of interception of subsurface flow was noted. But three forms of interception of subsurface flow were identified. These forms were classified as: 1- Return Flow, 2- Piping Flow and 3- Diffuse Flow. It was possible to monitor three places with these three different processes. The point 1- Return Flow was absolute in valley fund and humid areas, the point 2- Piping Flow predominated in sectors of medium branch and the point 3- Diffuse Flow was in sectors of high branch wiping the subsurface flow intercepted in deep cuts of slope of the road. It was observed that volumes of peak flow and level of water table were positive regarding rains on three monitored places. But the peak flow was more expressive regarding rain on point 2- Piping Flow and the level of water table was more positive and strong regarding rain on point 1- Return Flow. The conclusion is that no paved roads on Guabiroba River basin are essential elements in the connection between branch and river and that important water volumes have a preferential direction regarding the remaining system where the time for its action is much lesser than infiltration and dislocation in subsurface. So brunch and river are quickly interconnected changing the natural hidrogeomorphological action of the basin or brunch.

Key-words: hidrogeomorphological processes, interception forms, monitoring, conservation of water and soil.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Diversos são os motivos que levaram à elaboração desta pesquisa. A curiosidade para entender, ao menos parcialmente, os processos de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas pode ser talvez o maior deles. A escolha da bacia hidrográfica do Rio Guabiroba, Guarapuava-PR, como área de estudo, deve-se à praticidade ao acesso às propriedades, além de apresentar características distintas nos setores da vertente (alta, média e baixa vertente).

Outro fator que contribuiu para a realização da pesquisa, na referida bacia, está relacionado à continuação das pesquisas da dissertação de mestrado, na qual foi realizada uma avaliação das caixas de contenção de sedimentos como sistema de drenagem em estradas não pavimentadas da bacia do Rio Guabiroba. Na pesquisa de mestrado, buscou-se apenas avaliar a eficácia das caixas de contenção como medida de controle de sedimento, pois no momento não era objetivo identificar as formas de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas.

Por meio dos resultados obtidos no mestrado abriram-se algumas lacunas e, uma delas, foi justamente identificar os processos que atuam nas formas de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas. Assim sendo, o trabalho desenvolvido foi realizado na bacia hidrográfica do Rio Guabiroba (bacia experimental) no município de Guarapuava-PR, na qual são realizados diversos trabalhos paralelos como: redução de turbidez por meio da implantação de caixas de infiltração; estrada não pavimentada como fonte de escoamento superficial e sedimento; os efeitos das estradas não pavimentadas na concentração dos sedimentos em diferentes escalas espaciais entre outros, ambos com apoio da agência de fomento Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Para compreender o padrão de organização dos processos que operam na paisagem, os estudos em vertentes não podem ser conduzidos de forma pontual, devendo, então, considerar a conexão entre vertente e os canais fluviais. Para isso, é preciso entender os processos em vertente, sendo necessário antes de tudo compreender dois conceitos básicos: o conceito de estradas não pavimentadas e o conceito de fluxo subsuperficial.

Estradas não pavimentadas: são compreendidas como elementos geográficos presentes nas paisagens rurais que exercem forte controle sobre a circulação da água superficial e subsuperficial. Essas vias permitem o deslocamento de pessoas, veículos e animais, contribuindo, assim, com as necessidades básicas de uma sociedade.

Fluxo subsuperficial: ocorre quando a água, ao se infiltrar no solo, pode encontrar camadas menos permeáveis e se acumular sob elas. Quando isso ocorre, esse acúmulo começa a fluir (infiltrar) no solo e, assim, a água passa a escorrer em subsuperfície, caracterizando o chamado fluxo subsuperficial.

Existe também o fluxo superficial que ocorre quando a água que não infiltra no solo se acumula sobre a superfície, iniciando o fluxo superficial por excesso de saturação. No trabalho apresentado, o destaque foi dado ao fluxo subsuperficial por entender que existe ainda uma carência de estudos com essa finalidade.

As estradas não pavimentadas, portanto, são importantes como elementos reguladores na conexão entre vertente e rio, se tornando uma rede hidrográfica acessória na bacia hidrográfica. Uma das formas mais evidentes que as estradas não pavimentadas apresentam na conexão vertente e rio é por meio da interceptação do fluxo subsuperficial. O mesmo pode ser facilmente interceptado por cortes de estradas não pavimentadas, sendo redirecionado, contribuindo, assim, com os picos de vazão no rio, com consequente desestabilização de canais fluviais existentes.

Contudo, as pesquisas realizadas em estradas não pavimentadas são mais comumente direcionadas à explicar os efeitos das estradas na produção de sedimentos e erosão do solo, sendo que a compreensão dos processos das formas de interceptação do fluxo subsuperficial por meio de monitoramento das estradas rurais sem pavimentação ainda é necessária, já que elas têm dinâmicas diferentes em relação à produção de sedimentos e erosão do solo.

Os estudos sobre a interceptação do fluxo subsuperficial em estradas não pavimentadas têm aumentado nas últimas décadas, porém estes estudos ainda são escassos no Brasil. Entre as principais implicações das estradas pode-se destacar a interferência na circulação da água, a alteração no escoamento superficial e subsuperficial, produção de sedimentos e especialmente o aumento da conexão entre vertente e canal fluvial.

Por conseguinte, para entender os processos decorrentes da interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas não pavimentadas, é necessário responder algumas questões dos processos hidrogeomorfológicos nestas estradas, por exemplo: Como ocorre a interceptação do fluxo subsuperficial em estradas não pavimentadas? Quais são os processos hidrogeomorfológicos decorrentes dessa interceptação? Quais medidas podem ser tomadas para mitigar ou evitar os problemas decorrentes da interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas?

Como a caracterização, classificação e o monitoramento das formas de interceptação do fluxo subsuperficial podem contribuir para o planejamento de implantação de estradas não pavimentadas?

O reconhecimento das formas de interceptação do fluxo subsuperficial, ocasionado por estradas não pavimentadas, assim como a classificação e o monitoramento em relação aos efeitos que produz, são essenciais aos propósitos da Geomorfologia, bem como à conservação de solo e água, no âmbito das bacias hidrográficas, podendo cada vez mais expandir o conhecimento à respeito do assunto, trazendo respostas às indagações latentes.

Assim sendo, é necessário entender o comportamento relativo das estradas nas paisagens geográficas. Para isso este trabalho foi construído com base na hipótese de que os mecanismos diferenciados do funcionamento hidrológico de áreas interceptadas podem alterar a dinâmica natural da bacia hidrográfica, produzindo então, resposta hidrológica menor que por meio da infiltração e transferência de fluxo interno no solo, conectando de forma acelerada vertente e rio.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral: Compreender os mecanismos de funcionamento dos processos subsuperficiais que ocorrem em áreas que são interceptadas por cortes de estradas não pavimentadas.

1.1.2 Objetivos específicos:

- Relacionar a rede de drenagem e rede viária no âmbito da bacia hidrográfica do Guabiroba;
- Espacializar os diferentes tipos de possibilidades de interceptação do fluxo subsuperficial;
- Caracterizar e monitorar formas de interceptação do fluxo subsuperficial;
- Verificar a relação entre a interceptação do fluxo subsuperficial e sua localização nos setores da vertente;
- Compreender os processos decorrentes da profundidade do nível do lençol freático e vazão máxima em relação a chuva em diferentes setores da vertente;
- Verificar as diferenças e semelhanças nas formas de interceptação do fluxo subsuperficial.

CAPÍTULO 2
CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO
GUABIROBA

2 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO GUABIROBA

A bacia do Rio Guabiroba (BRG) está localizada no município de Guarapuava, mesorregião Centro Sul do Estado do Paraná (Figura 1). Situa-se entre as coordenadas geográficas: Latitude Norte $25^{\circ} 23' 00''$ Latitude Sul $25^{\circ} 26' 00''$ e Longitude Oeste $51^{\circ} 25' 00''$ Longitude Leste $51^{\circ} 20' 30''$. A bacia possui área de 24 km^2 (2,401 ha), a hierarquia fluvial é de 4ª ordem em escala de 1:10.000 e o canal principal apresenta 10,364 km de extensão, desde sua nascente até a foz no Rio das Pedras, que, por sua vez, faz parte do sistema do Rio Jordão-Iguaçu.

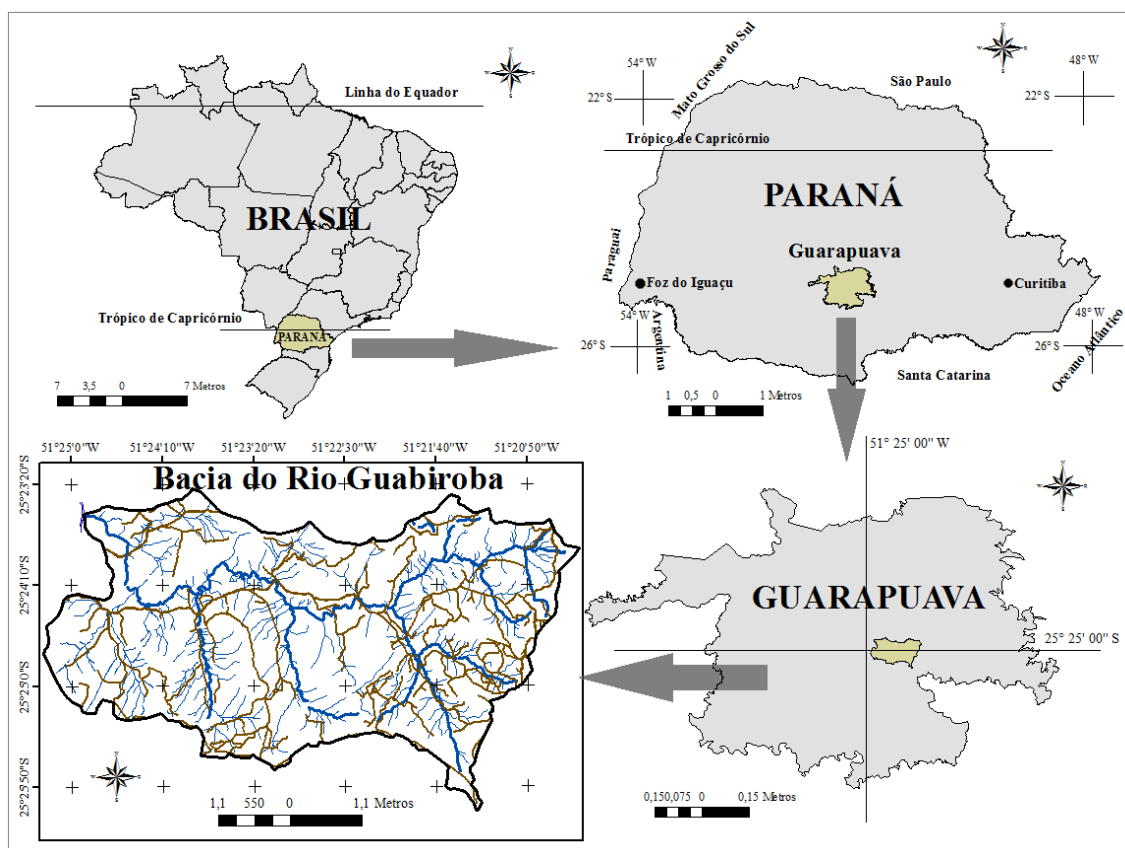


Figura 1- Localização da bacia do Rio Guabiroba em relação ao município de Guarapuava. Elaborado pela autora (2016).

A região de Guarapuava pode ser considerada, pela sua distribuição espacial, como ocupando o Centro Sul do Estado do Paraná, dessa forma pertence ao clima subtropical controlado por massas de ar tropicais e polares, sendo esta última com mais destaque (THOMAZ e VESTENA, 2003).

O clima em Guarapuava está sob o domínio da zona extratropical (subtropical), o que resulta em temperaturas com caráter mesotérmico, médias anuais entre 16°C e 20°C , inverno frio e verão amenizado pelas altitudes. As chuvas são abundantes e distribuídas ao longo do ano, portanto, não se distingue um período seco. A precipitação

média anual no município de Guarapuava é de 1.953,8 mm (THOMAZ e VESTENA, 2003). Na BRG, a pluviosidade mostra-se bem distribuída com média mensal de 138,4 mm.

O relevo da BRG é caracterizado por encostas íngremes e 65% da bacia apresenta altitudes superiores a 1.145m. A predominância de declividade na bacia refere-se às classes $> 12\%$ somando 66,54% da área. As classes $\leq 12\%$ representam 33,4% da área de estudo e estão presentes próximos aos cursos fluviais. Sendo assim, a bacia pode ser caracterizada com os terrenos de declividades média predominante (12 a 20%), a média/alta (20 a 30% e $\geq 30\%$) conforme mostra a Figura 2.

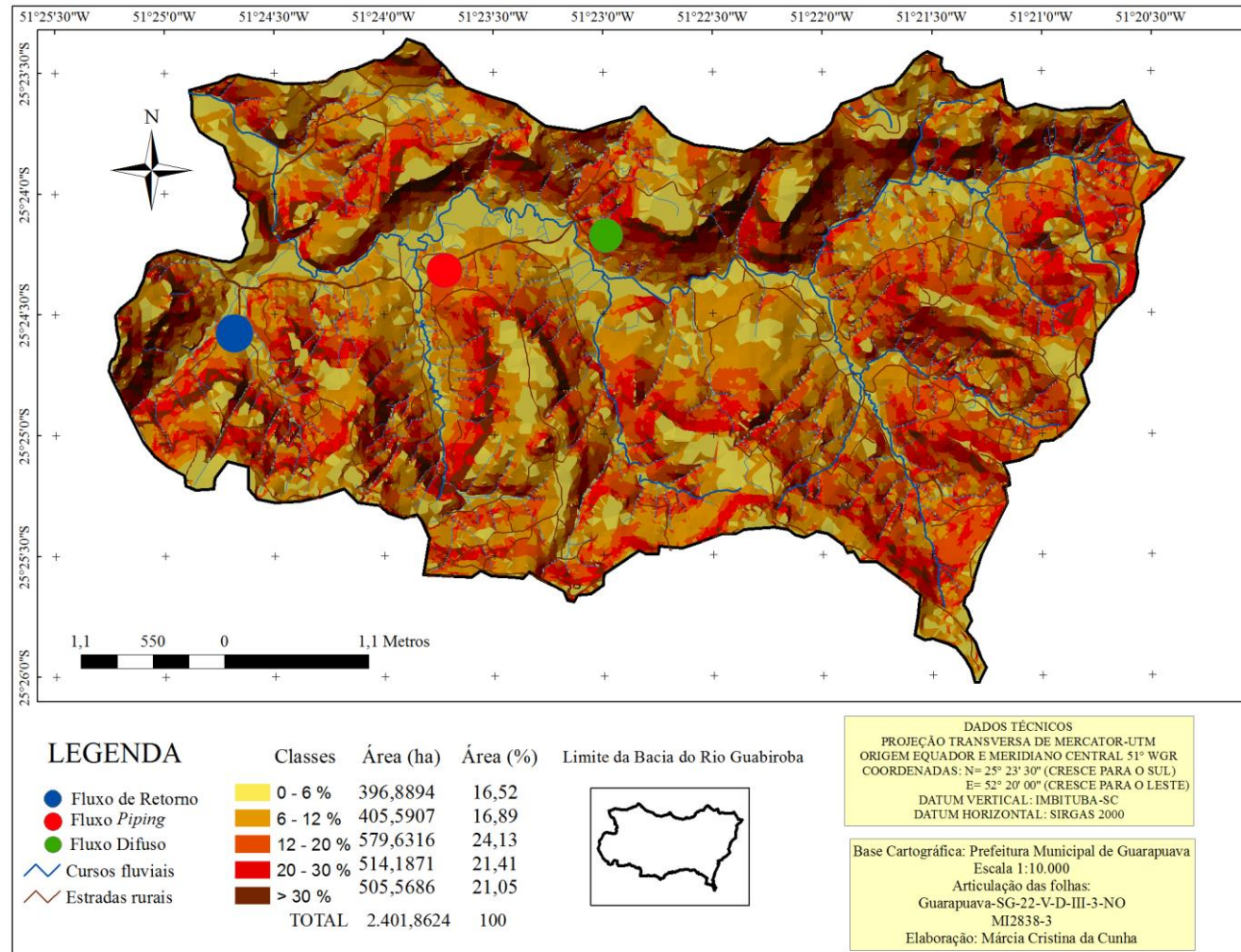


Figura 2- Declividade da bacia do Rio Guabirola.

Fonte: Base cartográfica da Prefeitura Municipal de Guarapuava (PMG).

Elaborado pela autora (2014).

As formas do terreno resultam da combinação entre as curvaturas vertical e horizontal. Como produto final da associação da curvatura vertical (côncavo, retilíneo e convexo) e curvatura horizontal (convergente, planar e divergente), se estabelecem nove classes distintas para as formas do terreno.

Com relação à distribuição dessas formas do terreno¹ da BRG, as formas divergente-convexo são predominantes na bacia com 25,03% da área, seguida pelas formas convergente-côncavo com 22,52% e juntas somam 47,56% da área. Essas formas de terrenos se distribuem em todas as unidades da bacia, concentrando-se, ainda, mais do médio para baixo curso. As formas convergentes representam 42,39% da área total da BRG, as formas divergentes somam 44,64% e, por fim, as formas planares representam a menor porção, sendo 12,97% da área da bacia. As formas convergente-retilínea são mais representativas do médio para o alto curso da bacia, e as formas convergente-convexa se distribuem de modo uniforme na área estudada (Figura 3).

Em áreas que existem drenagens (rios perenes e intermitentes), o predomínio das formas convergentes é mais preponderante, em especial a curvatura vertical côncava, e representam a maneira como os talvegues condicionam o fluxo hidrográfico em direção às áreas mais baixas destas formas.

As formas divergentes simbolizam a dispersão do escoamento, as quais propiciam a dificuldade do aparecimento de canais de drenagem e caracterizando, assim, o predomínio de locais com infiltração de água nos solos. Já nas áreas planas, não ocorre nenhuma forma considerável de terreno, pois a declividade é tão baixa que não propicia um modelado que possa ser representativo.

¹ O mosaico aprimorado para o território brasileiro TOPODATA que é um Guia para Utilização de Dados Geomorfométricos Locais. O TOPODATA utiliza dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) em que o nível do detalhe chega a 30 m, isso pode representar detalhe de até 1:50.000 no terreno em áreas não montanhosas.

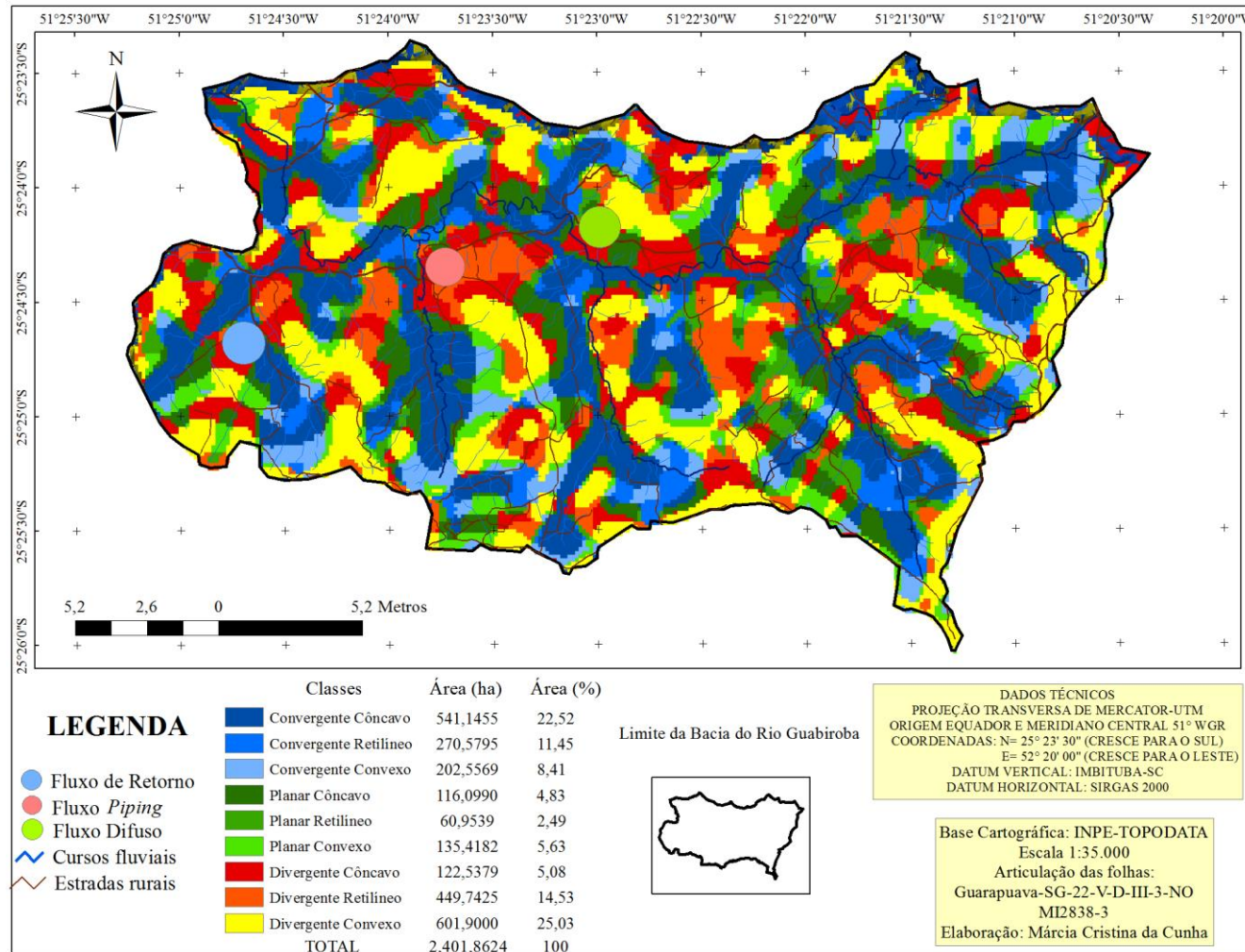


Figura 3- Formas do terreno da bacia do Rio Guabirola.

Fonte: TOPODATA utiliza dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

Elaborado pela autora (2016).

De maneira geral, existem quatro associações acerca do tipo de solo na BRG: Latossolo Bruno distrófico, Cambissolo Húmico distrófico, Neossolo Regolítico húmico, Gleissolo Melânico distrófico, ocorrendo também em algumas unidades o afloramento de rocha. Assim, tem-se uma modificação desses solos no âmbito da bacia, em que eles aparecem, na maioria das vezes em associação, ou seja, um tipo de solo predomina na unidade, contudo, possui inclusão de um ou mais elementos dentro da unidade. Esses solos distribuem-se entre muito rasos a rasos (0,25 a 0,50 m) e rasos a medianamente profundos (0,50 a 1,55 m).

Em relação ao uso da terra², de modo geral, na BRG é diversificado, envolvendo atividades relacionadas à agricultura, mata, reflorestamento, pastagem entre outras. As áreas edificadas, basicamente constituídas por pequenos vilarejos próximos às estradas principais e fundo de vale, representam 2,61% da área total.

As áreas com cobertura vegetal (mata, capoeira e reflorestamento) são significativas, ou seja, recobrem 70,48% da área total e grande parte das nascentes do rio principal. A pastagem recobre 19,88% da área e se concentra no alto e médio curso do Rio Guabiroba. Esse uso aparece em todos os setores da bacia, bem como nas diferentes unidades geomorfopedológicas e, por extensão, é praticado em declividade menor do que 12% até declividade superior a 40%.

A agricultura representa apenas 4,23% da área, sendo agricultura de subsistência em sua maioria. Com pouca extensão, é adequado ponderar que parte das áreas sob capoeira é potencialmente utilizada para agricultura (pousio) e, geralmente, são aquelas localizadas nas unidades geomorfopedológicas com maior aptidão, sendo praticada particularmente nos terrenos menos declivosos (Figura 4).

² Para esse mapeamento foi utilizado a base cartográfica da Prefeitura Municipal de Guarapuava de 2002 e foi realizada uma atualização do banco desse banco de dados utilizando a imagem do *software Google Earth* para o ano de 2014, assim como levantamento de campo.

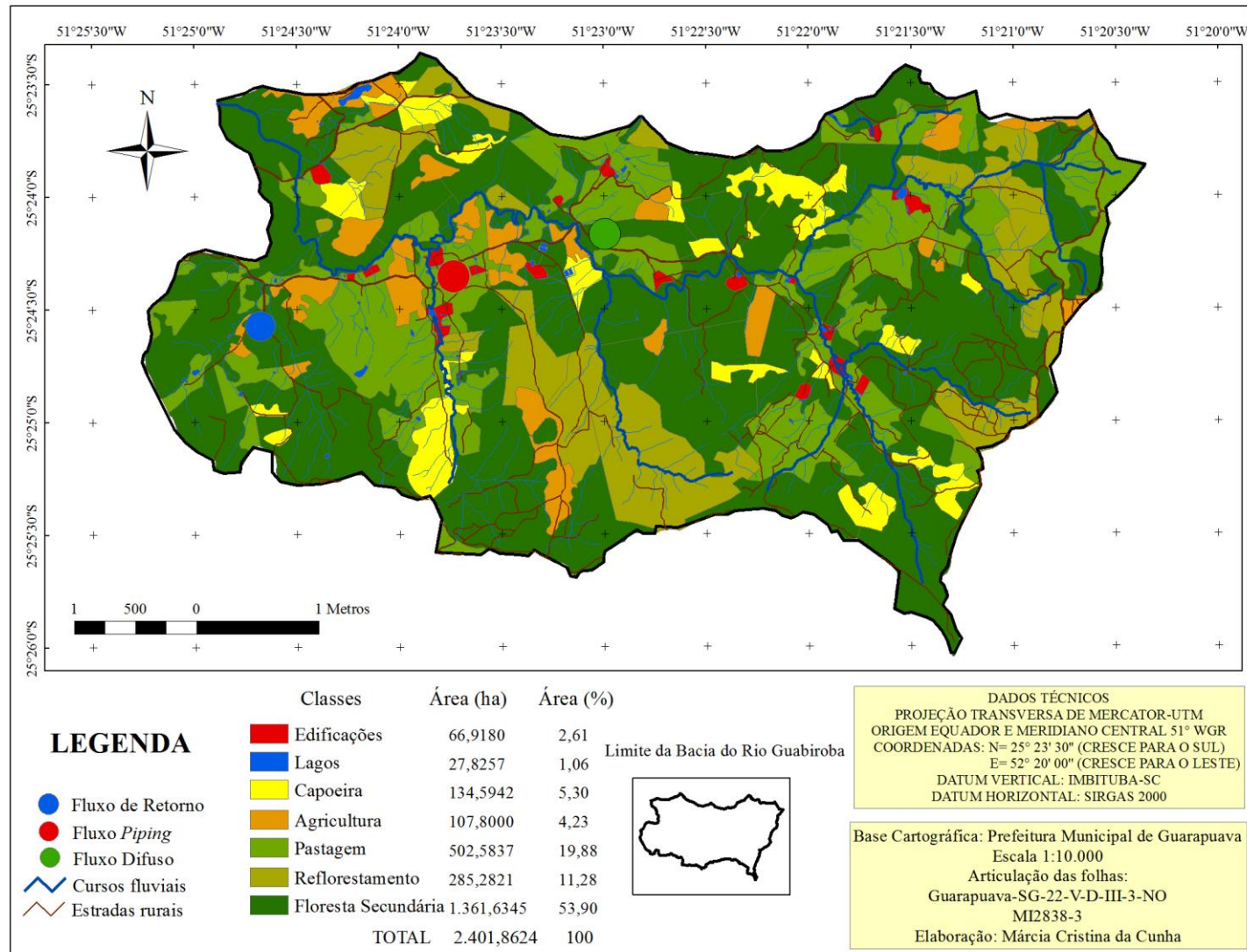


Figura 4- Uso da terra da bacia do Rio Guabirola.

Fonte: Base cartográfica da Prefeitura Municipal de Guarapuava (PMG).

Elaborado pela autora (2014).

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

3.1.1 Elementos lineares presentes nas paisagens rurais

As estradas permitem o acesso de pessoas e mercadorias aos pontos mais remotos de uma nação. De utilidade indiscutível para indivíduos, sociedades e economias de qualquer período da história, o deslocamento por via terrestre transformou-se no principal meio de transporte de curtas, médias e longas distâncias do mundo contemporâneo.

De forma geral, estradas são entendidas, nesta pesquisa, como elementos geográficos (de forma linear) presentes nas paisagens rurais. Estas, desde caminhos primitivos ou vias modernas com grande infraestrutura, permitiram e permitem a interligação entre regiões, influenciando no aspecto social, econômico e cultural das nações. Estradas podem ser definidas como faixas de terreno com características adequadas para permitir o deslocamento de pessoas, veículos e animais (CUNHA, 2011). O sistema de transporte que fornece acesso seguro e confiável para empregos, educação, cuidados de saúde e de bens e serviços é tão importante para as comunidades rurais, quanto é para áreas urbanas (FAIZ *et al.*, 2012).

As estradas não pavimentadas formam a ligação mais importante em termos de fornecimento de acesso à população rural. A ausência permanente ou sazonal da estrada é um fator limitante em termos de fornecimento às comunidades rurais com serviços essenciais, como a educação, cuidados de saúde, as mercadorias locais, bem como as oportunidades econômicas. A disponibilidade de tais serviços e as oportunidades é difícil de sustentar sem uma boa qualidade da malha viária rural, que proporciona acesso regular e eficiente de transporte ao longo do ano (BUILDING RURAL ROADS, 2008).

Luce e Wemple (2001) mencionam que as estradas tem sido uma parte de paisagens humanas há mais de 40 séculos. Durante o século XX, avanços tecnológicos têm aumentado a nossa capacidade de construir novas estradas sem precedentes em terrenos íngremes. Na última metade do século, uma extensa rede de estradas foi construída em florestas e outras áreas naturais para facilitar o uso dos recursos naturais.

Este aspecto também é notado por Faiz *et al.*, (2012), no qual comentam, que com o aumento da população mundial para cerca de 9 bilhões de pessoas até 2050, será necessário também, um aumento na produção de alimentos, exigindo assim, enormes melhorias nos sistemas viário de abastecimento e de comercialização agrícola. Para isso

será necessário a implantação de 1 a 2 milhões de quilômetros de estradas não pavimentadas a cada década. As estradas não pavimentadas, portanto, fornecem um elo crucial na rede de transporte rodoviário, facilitando acesso e desenvolvimento de áreas rurais. Embora estas estradas somem a maior parcela da malha viária, nem sempre os investimentos são aplicados de forma igualitária, necessitando, assim, de uma atenção mais específica para seu bom desenvolvimento (BUILDING RURAL ROADS, 2008).

No que diz respeito ao Brasil, a rede viária é constituída em sua maioria por estradas não pavimentadas. Estas apresentam grande importância no Brasil, pois fazem a ligação entre áreas rurais, povoados e vilarejos e as áreas urbanas. À princípio muitas destas estradas foram implantadas para a própria retirada da madeira e servindo, também, como base para o escoamento da produção agrícola. Dessa forma, deve-se dar uma atenção especial aos processos decorrentes da implantação de estradas não pavimentadas em diferentes unidades Geomorfológicas, na tentativa de minimizar os impactos procedentes.

3.1.2 Características das estradas brasileiras

De início é importante destacar que a história do rodoviarismo no Brasil está ligada ao processo de integração do território brasileiro, o qual se deu com as primeiras estradas abertas pelos colonizadores portugueses e por outros imigrantes que se estabeleceram nas diversas regiões brasileiras, e pelos habitantes das vilas que se formavam em todo o país. Por essas primitivas estradas de rodagem, fazia-se a ligação entre as regiões em que se transportavam as mais diferentes mercadorias (GUIMARÃES *et al.*, 2004).

Baesso e Gonçalves (2003) enfatizam que muitas delas, ao terem evoluído originalmente de pequenas trilhas e caminhos utilizadas pelos primeiros grupos de pessoas que se estabeleceram nas mais diversas regiões, apresentam traçados atravessando locais cujo solo denota grande fragilidade, ou seja, a localização dessas estradas era orientada basicamente pela estrutura fundiária e pelas facilidades do terreno.

Considerando a impossibilidade de um planejamento adequado dessas estradas, a determinação do traçado das mesmas, isto é, do percurso que lhe era atribuído, achava-se subordinada a um conjunto de considerações de ordem econômica, técnica e mesmo estratégica que fizeram dessa operação uma das mais delicadas e complexas. Tratando-se de uma estrada única ou de um conjunto de novas estradas, o estudo do

traçado era feito em função de critérios variáveis, conforme a importância da estrada (BAESSO e GONÇALVES, 2003).

No Estado do Paraná essa condição rudimentar de implantação inicial de estradas também prevaleceu. Guimarães *et al.*, (2004) realçam que os imigrantes trabalhavam tanto na abertura quanto na manutenção das estradas de rodagem, sendo essa atividade uma forma de quitação de suas dívidas com investimento realizado pelo Estado no processo migratório.

Ainda hoje, no Brasil, a malha da rede viária é composta em sua maioria por estradas não pavimentadas, elas são o principal meio de escoamento da produção agropecuária. Contudo, apesar de sua extensão e da grande importância econômica, social e ambiental, as estradas não pavimentadas constituem um tema pouco estudado, quase sempre relegado a segundo plano (ODA *et al.*, 2007).

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte-DNIT (2014), por tipo de superfície o Brasil possui 87% de vias não pavimentadas e àquelas que são planejadas somam apenas o total de 129.262,00 (7,6%) km (Tabela 1).

Tabela 1- Malha viária existente a nível nacional, estadual, municipal e local.

<i>Local</i>	<i>Vias pavimentadas km</i>	<i>Vias pavimentadas (%)</i>	<i>Vias não pavimentadas km</i>	<i>Vias não pavimentadas (%)</i>	<i>Total de vias km</i>
Brasil	202.988,10	13	1.358.913,70	87	1.561.901,8
Paraná	19.343,3	16,4	98.172,9	83,6	117.516,2
Guarapuava	160,10	15,1	896,28	84,9	1.056,38
BRG	0	0	130	100	130

Fonte: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte-DNIT (2014).

Departamento de Estrada e Rodagem-DER (2014).

Elaborada pela autora (2015).

Em relação à rede rodoviária nacional não pavimentada por jurisdição 12.661,70 (0,9%) km são de estradas Federais, 111.333,70 (8,2%) km são Estaduais e a maioria sendo um total 1.234.918,30 (90,9%) km é Municipal (DNIT, 2014).

Griebeler (2002) enfatiza que em paralelo às questões econômicas e sociais, as questões ambientais são essenciais dentro dos estudos de implantação e conservação de estradas não pavimentadas. Fonte de processos erosivos expressivos, as estradas não pavimentadas alteram as características naturais do terreno, modificando o percurso natural do fluxo superficial e subsuperficial, alterando a capacidade de infiltração da

água no solo e, em alguns casos, concentrando águas advindas de áreas adjacentes, funcionando de maneira semelhante a um canal de drenagem.

Existem trabalhos científicos sobre os processos hidrogeomorfológicos em estradas não pavimentadas no Brasil, porém ainda devem ser mais explorados, ainda mais que o país ocupa o quarto lugar com rede viária de estradas não pavimentadas em todo o mundo (FAIZ *et al.*, 2012). Com malha viária composta em sua maioria por estradas não pavimentadas, nota-se, portanto, que os estudos sobre a implantação dessas vias são importantes para a compreensão dos processos hidrogeomorfológicos que se desenvolvem em bacias hidrográficas.

3.2 FLUXO SUBSUPERFICIAL

3.2.1 *Propriedades dos fluxos subsuperficiais em bacias hidrográficas*

A água é regulada e transferida pela vertente basicamente por dois caminhos: fluxo em superfície e fluxo em subsuperfície. O fluxo em superfície, segundo Horton (1945), é aquele em que a superfície do solo divide a chuva numa parte que rapidamente é convertida em escoamento superficial até chegar aos cursos d'água naturais, já a outra parte é introduzida no solo e, assim, de forma gradual, escoar através da matriz do solo até o canal fluvial ou perde-se por evapotranspiração para a atmosfera.

Um paradigma de geração de fluxo alternativo tem sido sugerido há mais de cinco décadas. O chamado fluxo subsuperficial surgiu como uma hipótese alternativa na década dos 1960, porque o serviço florestal americano observou que o fluxo Hortoniano não acontecia tal como foi postulado. As observações de Hewlett e Hibbert, em 1963 e 1967, e depois Weyman (1970) mostraram a precipitação nas partes altas da bacia se infiltrava dentro do solo, aumentando o teor de umidade local e transmitindo a saturação para as áreas de jusante. Nestas áreas saturadas, a capacidade de infiltração era muito baixa. Esse fluxo subsuperficial pode ser resultado do deslocamento da água armazenada nos bancos dos canais e filtradas em áreas permeáveis.

Trabalhos posteriores aos de Hewlett e Hibbert, aprofundaram-se na localização das áreas saturadas e nos mecanismos internos das vertentes. Assim, foram monitoradas bacias cujos resultados demonstraram de forma clara que as áreas saturadas poderiam ocorrer em lugares afastados dos cursos naturais. Essas áreas distantes têm conexões efetivas com partes baixas dos vales e contribuem com escoamento rápido para os canais através de caminhos preferenciais e fluxos internos do solo. De modo geral, quando a água percolada verticalmente encontra valores de condutividade hidráulica

menores a medida que varia com a profundidade, ocorre então, a formação de uma camada de saturação (MENDIONDO e TUCCI, 1997).

De acordo com Dunne (1978), a precipitação pode chegar ao rio através de caminhos bastante diferenciados: (i) precipitação direta sobre o rio; (ii) escoamento superficial; (iii) escoamento subsuperficial próximo à superfície; e (iv) escoamento subterrâneo profundo. No presente estudo, a ênfase foi dada ao escoamento subsuperficial por meio da interceptação por estradas não pavimentadas. Na Tabela 1 e Figura 5 apresenta-se a diversidade dos processos de escoamento que podem ser encontradas em uma bacia hidrográfica.

Tabela 1- Processos de fluxos numa bacia hidrográfica

Processos	Linha de pesquisa
Fluxo superficial excedente de infiltração (ESI)	Horton (1933)
Fluxos internos (E i)	Hewlet e Hibbert (1967)
i) Efeito pistão	Ward (1984)
ii) Escoamento de retorno;	Dunne (1978), Ward (1984)
iii) Fluxo de macroporos	Beven e Germann (1982)
iii-1) longitudinais (<i>'piping'</i>)	Jones (1971)
iii-1-1) gradientes do potencial (<i>'seepage piping'</i>)	Jones (1986)
iii-1-2) por interconexão (<i>'by-pass piping'</i>)	Dunne e Black (1970)
iii-2) condutos verticais	Germann (1986)
iv) intumescência da camada saturada	Sklash e Farlvoden (1979)
Escoamento Superficial por Saturação do solo (ESS)	Dunne (1978, 1983)
Escoamento pela Integração de Processos (EIP)	Kirkby (1988), Grayson <i>et al.</i> , (1992), Wheater <i>et al.</i> , (1983)

Fonte: Adaptado de Mendiondo e Tucci (1997).
Organizado pela autora (2015).

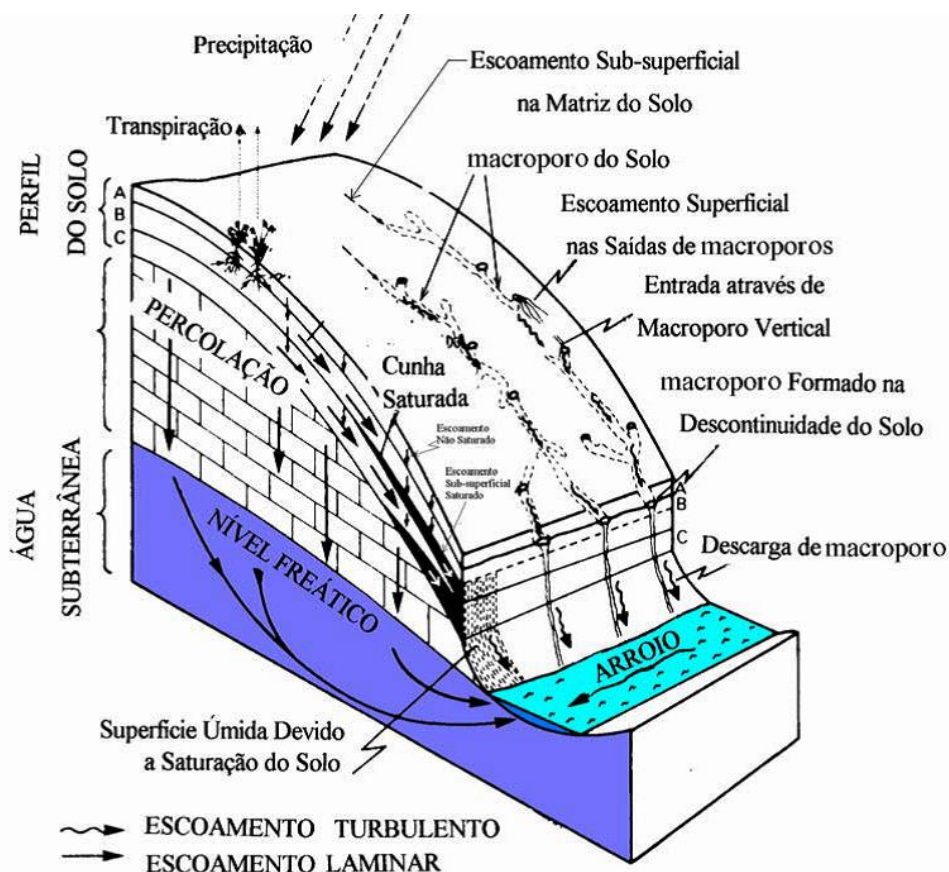


Figura 5- Visão distribuída da geração de escoamento na vertente.
Fonte: Atkinson (1978).

Esse sistema é resultante da inter-relação entre as formas, os materiais e os processos que o configuram como seus elementos. A vertente se comporta como sistema em cascata, pois nela ocorre transferência de energia e matéria, essa transferência é comandada principalmente por forças gravitacionais, hidráulicas e químicas. A transferência de água, sedimentos e elementos químicos na vertente ocorrem por meio de vários fluxos que variam no tempo e no espaço, ao longo do sistema vertente, podendo ser superficiais e subsuperficiais, e entre os principais fluxos estão: o fluxo hortoniano, o fluxo superficial saturado, o fluxo de retorno, o fluxo subsuperficial não saturado e saturado e o fluxo subsuperficial através de duto ou túnel conhecido como *piping* (CHORLEY, 1978).

Dos fluxos internos (fluxos subsuperficiais), três deles se destacam por ocorrer com mais frequências em bacias hidrográficas e serão conceituados a seguir: (McDONNELL, 2003; LIN *et al.*, 2006; LIN *et al.*, 2008; SIDLE e ZIEGLER, 2012).

- 1- *Fluxo subsuperficial em área saturada ou de retorno*: chamado de fluxo de retorno em subsuperfície (ou refluxo), ocorre depois que a água se infiltra no solo e, em seguida, flui lateralmente através do solo e exfiltrando nas áreas de menor declive ou mais perto do canal fluvial, sendo mantidas pelas chuvas incidentes e pelo fluxo subsuperficial das áreas a montante (WHIPKEY, 1965; DUNNE *et al.*, 1975; DUNNE, 1978).
- 2- *Fluxo subsuperficial pontual (piping)*: são formados pela ação erosiva dos fluxos subsuperficiais que arrastam o material fino da matriz porosa. Esse processo envolve a progressiva expansão dos macroporos, principalmente devido à tensão de cisalhamento exercida pela água corrente. Esses poros podem ser formados por raízes de plantas, atividades da fauna, fissuras, rachaduras ou condutos naturais dentro do solo (DUNNE, 1990; BRYAN e JONES, 1997).
- 3- *Fluxo subsuperficial paralelo ao talude*: ocorre quando a micro-topografia não provoca um único canal. É a drenagem disseminada paralela à vertente por meio dos microporos existentes no solo que responde, geralmente, às mudanças nos gradientes hidráulicos. Nessa forma de fluxo subsuperficial não há uma hierarquia do fluxo (GOVERS, 1987; KIRKBY, 1988).

De acordo com Mediondo e Tucci (1997) as vertentes hidrográficas são as áreas elementares onde as escalas locais e globais do ciclo hidrológico, nos domínios atmosféricos e superfície terrestre produzem uma maior inter-relação, integrando micro-efeitos. Esses micro-efeitos podem estar relacionados com a forma de infiltração e percolação da água no solo.

A infiltração e a percolação envolvem três processos interdependentes: entrada de água no topo do solo, armazenamento dentro do solo e transmissão de água através do solo. Qualquer alteração em um desses três processos altera a resposta hidrológica de uma área, principalmente a alteração na transmissão da água no solo por meio da interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas (DUNNE, 1978; IMENSON, 1985). Portanto, as estradas não pavimentadas podem se tornar elementos importantes na conexão da vertente com o rio, alterando a resposta hidrológica da bacia hidrográfica.

3.3 INTERCEPTAÇÃO DO FLUXO SUBSUPERFICIAL POR ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

3.3.1 Estradas não pavimentadas como elementos de conexão vertente com o canal fluvial

O interesse crescente no fluxo subsuperficial e a erosão provocada por esse processo, resultou em extensas revisões de pesquisas sobre o significado hidrológico e geomorfológico de fluxos em subsuperfície. A importância de um estudo global sobre como os processos geomorfológicos atuam e como os fluxos subsuperficiais são eficientes na transferência de água, sedimento e solutos para as partes mais baixas das encostas e os canais fluviais é fundamental na prevenção dos impactos gerados por esse processo (BRYAN e JONES, 1997).

Em geral, as pesquisas são mais concentradas em processos geomorfológicos ao longo do leito da estrada não pavimentada do que em métodos detalhados de mapeamento do terreno, juntamente com o desenvolvimento de sua rede viária. Em contraste com as formas fluviais naturais, o traçado das estradas não pavimentadas depende também dos fatores antropogênicos. O fluxo de água nas estradas não pavimentadas, nem sempre correspondem aos processos naturais que ocorrem nos leitos dos rios, tornando-se, assim, uma rede de drenagem artificial que complementa o sistema de drenagem natural da bacia hidrográfica (WALDYKOWSKI e KRZEMIENÍ, 2013).

Luce e Wemple (2001) destacam que estes efeitos hidrológicos são parcialmente responsáveis por mudanças nos processos geomorfológicos e sedimentológicos em bacias com estradas não pavimentadas. O escoamento lateral de estradas e o escoamento subsuperficial interceptado contribuem para a erosão do solo. Por sua vez, a concentração marginal da água coletada ao longo do comprimento da estrada aumenta o risco de deslizamentos de terra, taludes e desestabilização de canais de fluxo existentes.

Outro aspecto levantado pelos autores citados é que a natureza linear de estradas e sua tendência de se localizar em diferentes gradientes topográficos produz uma influência sobre processos hidrológicos em escala de bacias hidrográficas, que é muito maior do que se poderia esperar de uma pequena fração da área de terra que ocupam. A concentração de escoamento superficial de estradas quase impermeáveis ligadas à interceptação do fluxo subsuperficial aumenta a densidade de drenagem, deslocando a distribuição de água na bacia e, potencialmente, aumentando picos de vazão (LUCE e WEMPLE, 2001; WEMPLE, 2013).

Em ambientes rurais e úmidos, onde a capacidade de infiltração do solo tipicamente excede as taxas de precipitação, estradas representam superfícies relativamente impermeáveis que geram escoamento superficial (CROKE e MOCKLER 2001; LUCE 2002; SIDLE e ZIEGLER, 2012). Outro processo eficaz nesses ambientes é quando as estradas são construídas nas encostas, de terreno montanhoso. O fluxo subsuperficial pode ser interceptado junto aos cortes de estradas ou valas e redistribuído como fluxo concentrado (WEMPLE e JONES, 2003; ZIEGLER *et al.*, 2012; SIDLE *et al.*, 2014). Por meio desses vários mecanismos, estradas interceptam a água do fluxo subsuperficial em níveis significativamente potenciais para ampliar a rede de canal natural.

Constata-se, portanto, que as estradas alteram os processos geomorfológicos e hidrológicos e, por extensão, afetam o movimento de água e sedimento na bacia hidrográfica. A interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas cada vez mais vem ganhando destaque no meio científico. Já durante os anos de 1960 e 1970, a complexidade da geração do fluxo subsuperficial e o impacto que este fluxo gera começaram a aparecer em alguns trabalhos como, por exemplo (WHIPKEY, 1965; KIRKBY e CHORLEY, 1967; BETSON e MARIUS, 1969; DUNNE e BLACK, 1970; WELC, 1972). E nas últimas décadas houve um interesse crescente por estudos relacionados à interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas (JONES, 1981; HARTSOG *et al.*, 1997; LUCE e WEMPLE, 2001; CHAPPELL, 2010; SIDLE e ZIEGLER, 2012; SIDLE *et al.*, 2014).

Hartsog *et al.*, (1997) mencionam que a interceptação do fluxo subsuperficial por estradas florestais é percebido como uma causa significativa de danos ao ecossistema florestal, pois interceptado, concentrado, redirecionado, ou interrompido por cortes das estradas, o fluxo de águas subsuperficiais pode levar ao aumento da água de superfície, taxas de erosão aceleradas, maior fluxo de pico de vazão e reduzir a umidade do solo. Variando os perfis do solo, a geologia, clima, e as características da estrada, torna-se mais difícil prever a magnitude de interceptação do fluxo de água subsuperficial.

Uma generalização feita, muitas vezes, com relação aos efeitos de estradas para as águas subsuperficiais, é que uma das principais causas de redução do fluxo de águas de subsuperfície é atribuída à compactação do solo associado com a construção de estradas. A compactação forneceria apenas uma medida indireta da interceptação do fluxo de água de subsuperfície e, além disso, não existe nenhum método de previsão de

profundidade e compactação de estradas florestais (HARTSOG *et al.*, 1997). Corroborando com essa ideia Kahklen *et al.*, (1999); Waldykowski e Krzemień (2013), apontam que os efeitos de estrada em níveis das águas subsuperficiais são importantes considerações na determinação do impacto no sistema hidrológico de bacias hidrográficas.

Com a interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas pode ocorrer um aumento nos picos de vazão do canal receptor e, conseqüente, erosão. Em algumas condições pode provocar o alargamento dos canais que recebem os fluxos subsuperficiais desviados. Os sistemas de drenagem da estrada podem facilmente exceder sua capacidade, uma vez que necessitam comportar também o fluxo subsuperficial interceptado (FURNISS *et al.*, 1997).

Os autores enfatizam que no lugar em que a água é desviada pela estrada ou vala e depois redirecionada para uma inclinação natural, um novo fluxo pode ser originado, podendo, assim, envolver uma grande quantidade de erosão ou mesmo um novo canal (Figura 6). Os processos dessa interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas, quando ignorados, podem continuar por longos períodos, muitas vezes por anos ou décadas. Nos lugares em que as estradas são abandonadas ou com pouca frequência de uso e de manutenção, este processo pode produzir impactos na qualidade da água (FURNISS *et al.*, 1997).

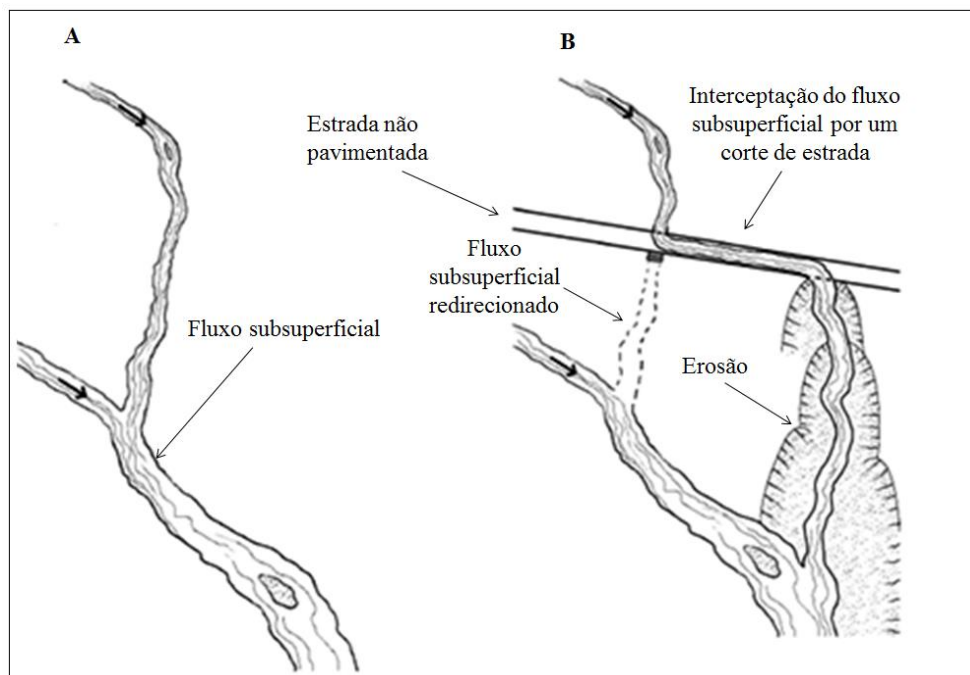


Figura 6- Interceptação do fluxo subsuperficial por cortes da estrada. Em A, direção do fluxo subsuperficial, em B, erosão provocada pelo fluxo subsuperficial interceptado por cortes de estradas não pavimentadas.

Fonte: Adaptado de FURNISS *et al.*, (1997).

Sidle e Ziegler (2012) destacam que devido à proximidade com os canais fluviais e a interceptação do fluxo de subsuperfície por estradas não pavimentadas, 78% da perda de solo em uma área com práticas agrícolas foram registrados no sudoeste da Ásia. As estradas e caminhos ocupam pouca área da bacia hidrográfica, mas se tornam eficientes no transporte de sedimentos para os canais fluviais. Tal problema de erosão e sedimentação é notado no sudeste da Ásia.

Esse problema é evidenciado também em uma bacia hidrográfica da região de *Mae Sa* nas montanhas do norte da Tailândia, no qual Ziegler *et al.*, (2004) destacam que a remoção florestal extensiva e a intensificação da agricultura em encostas íngremes durante as últimas décadas têm sido ligada à evolução dos fenômenos hidrológicos e de sedimentação e, assim, a expansão da rede de estradas não pavimentadas exerce um papel fundamental na sedimentação dos canais fluviais nessa região.

Luce (2002) e Wemple (2013) destacam que os efeitos da interceptação do fluxo em subsuperfície e a redistribuição desse fluxo interceptado estão intimamente ligados à cortes das estradas. E essa redistribuição do fluxo interceptado pode afetar significativamente a estabilidade do talude por meio de cortes da estrada e a percolação do fluxo subsuperficial interceptado, assim como os picos de vazão nos rios com o redirecionamento do fluxo subsuperficial.

Um ponto importante a ser avaliado no caso do fluxo subsuperficial é a visão de que a conexão vertente e rio no sistema não acontecem de maneira livre, ou seja, não se pode ignorar a interceptação e o redirecionamento do fluxo subsuperficial causado por cortes de estradas não pavimentadas. Um exemplo disso é a relação direta feita entre precipitação e vazão, onde nem toda a precipitação, a montante da bacia é a vazão, a jusante. Vários trabalhos indicam o efeito das estradas não pavimentadas na dinâmica da produção de sedimentos em bacias hidrográficas, entretanto estudos relacionados às formas de interceptação do fluxo subsuperficial por estas estradas e a contribuição da vazão no rio com o fluxo interceptado, ainda é escasso.

Portanto, pesquisas voltadas aos processos de interceptação do fluxo subsuperficial por cortes de estradas não pavimentadas são essenciais aos propósitos da Hidrogeomorfologia, em que as estradas não pavimentadas são importantes elementos na conexão vertente e rio por meio da interceptação do fluxo subsuperficial alterando a resposta hidrogeomorfológica natural da bacia.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de atingir os objetivos propostos na pesquisa, auxiliar na obtenção dos dados e na interpretação dos resultados, os seguintes procedimentos metodológicos foram utilizados: revisão bibliográfica, trabalho de gabinete, trabalho de laboratório e trabalho de campo. No presente estudo, optou-se por um esquema teórico denominado empírico-cartográfico-monitoramento, proposto Thomaz (2005) e modificado pela autora, aliado à observação direta de processos (Figura 7).

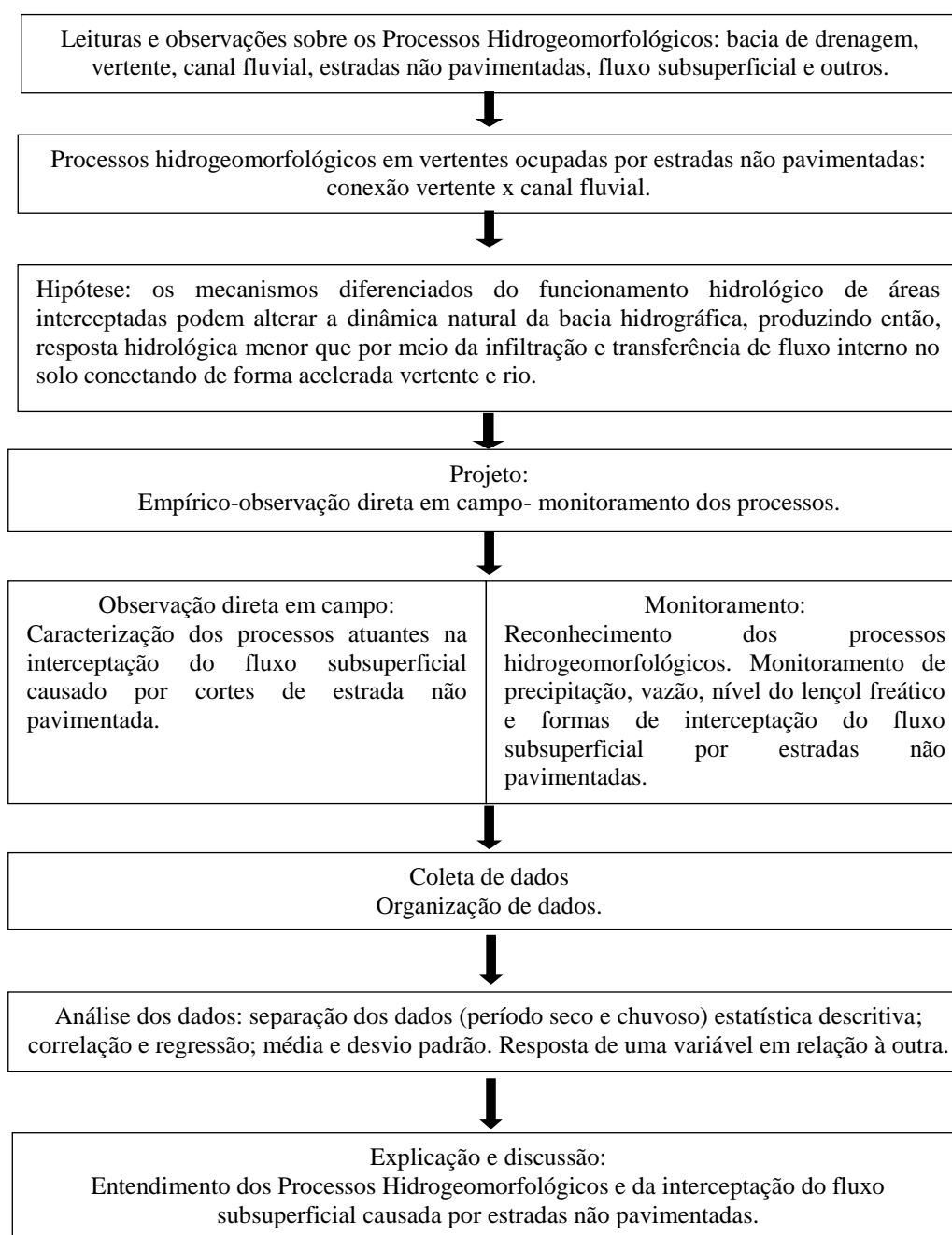


Figura 7- Esquema teórico empírico-cartográfico e de monitoramento (Baseado em Thomaz, 2005). Fonte: Adaptado de Thomaz (2005). Organização (Cunha, 2014).

4.1 Revisão bibliográfica

Em busca do conhecimento existente sobre o meio físico regional, foram consultados trabalhos desenvolvidos anteriormente que envolveram sistema hidrogeomorfológicos em bacias hidrográficas. Foi realizado também um levantamento minucioso a respeito do assunto abordado para dar suporte ao embasamento da pesquisa.

A seleção do material bibliográfico teve como principal subsídio os livros dispostos no acervo da Biblioteca da Universidade Estadual do Centro Oeste do Paraná-UNICENTRO, Campus Cedeteg, e no acervo da Biblioteca da Universidade Federal do Paraná-UFPR, assim como artigos de periódicos e outras fontes consultadas na *internet*.

4.2 Trabalho de gabinete

Consistiu na reunião das informações necessárias à execução da pesquisa (banco de dados da BRG) e a escolha das informações mais significativas para a pesquisa.

4.3 Inventário para caracterização e monitoramento das formas de interceptação do fluxo subsuperficial

Para identificar as formas (aspectos) de interceptação do fluxo subsuperficial ocasionado por cortes de estradas não pavimentadas e, posteriormente, monitorá-los foram realizadas seis etapas principais. O período total para identificação foi de 6 meses (dezembro de 2013 a maio de 2014). O monitoramento se deu no período de maio de 2014 até agosto de 2015, total de 1 ano e 3 meses. As etapas estão descritas a seguir:

4.3.1 Etapa 1- Identificação preliminar das formas de interceptação. Nessa etapa foram percorridas todas as estradas da BRG, com um total de 130 km de estradas não pavimentadas. O objetivo foi observar e identificar inicialmente os locais potenciais para interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas. Locais com umidade e afloramento de água no talude e na estrada, presença de vegetação como samambaias ou juncos (plantas que crescem em lugares úmidos), dutos em atividade nos períodos de chuva e áreas em fundo de vale. As observações ocorreram logo após os eventos pluviométricos (em média de 10 a 20 min depois da chuva) com o intuito de separar o fluxo superficial do fluxo subsuperficial.

4.3.2 Etapa 2- Distinção das formas de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas. Com as observações realizadas na etapa 1 foi possível notar diferenças nas formas de interceptação do fluxo subsuperficial, ou seja, nas

estradas percorridas as feições das formas de interceptação eram heterogêneas a medida que se percorria diferentes unidades topográficas da BRG, sendo mais comum em três locais (fundo de vale, próximo a áreas úmidas e paralela ao talude da estrada). Nessa etapa foi observado também as repetições das formas (feições) de interceptação do fluxo subsuperficial por cortes de estrada, ou seja, o objetivo foi verificar e associar as características de cada forma de interceptação do fluxo por estrada com os locais em que foram localizados (observados).

4.3.3 Etapa 3- Mensuração e caracterização das formas de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes de estradas. Foi mensurado o número dos locais que ocorriam à interceptação do fluxo subsuperficial por cortes de estradas no total percorrido de 130 km de estradas na BRG. Desses 130 km de estradas percorridos, no total foram mensurados 20 locais (pontos) dessa interceptação do fluxo subsuperficial pela estrada. O objetivo dessa etapa foi distinguir as diferentes características das formas de interceptação do fluxo subsuperficial, isto é, dos 20 locais quantificados, foi possível observar que 3 (três) formas distintas se destacavam com frequência. Essas formas são: 1) a interceptação sob a forma que ocorria próxima aos rios e em área úmida, 2) a interceptação que ocorria por meio de dutos (*piping*) e 3) a interceptação que ocorria paralela ao talude da estrada.

4.3.4 Etapa 4- Denominação das formas de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas. Nessa etapa, foi designado o nome para cada forma de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas. Os mesmos foram nomeados da seguinte forma: 1) Fluxo de Retorno, 2) Fluxo *Piping*, e 3) Fluxo Difuso. Essa denominação se baseou, principalmente, na observação direta dos processos e aspectos que cada fluxo subsuperficial apresentava.

4.3.5 Etapa 5- Escolha dos locais para monitoramento. Após a identificação dos 20 pontos de interceptação e da denominação das formas de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas, procedeu-se a escolha dos locais (pontos) para monitoramento. Por motivo de logística e da impossibilidade de monitorar os 20 locais encontrados nos 130 km de estradas percorridos, foram escolhidos 3 locais com 3 formas distintas de interceptação. A distância do ponto 1) Fluxo de Retorno para o ponto 2) Fluxo *piping* foi de 7,8 km, e a distância desse ponto para o ponto 3) Fluxo difuso foi de 5,6 km, percorrendo um total de 13,4 km de estradas para o monitoramento. O objetivo principal do monitoramento foi notar a dinâmica do processo, bem como o tempo de permanência que cada ponto monitorado permaneceu

em atividade. Ressalta-se que esses 3 pontos monitorados são representativos em relação ao total dos 20 pontos de interceptação encontrados.

4.3.6 Etapa 6- Interpretação dos dados obtidos por meio do monitoramento.

Essa etapa de observação direta em campo, consistiu na interpretação dos processos hidrogeomorfológicos decorrentes da interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas como, por exemplo: impactos no talude e na estrada provocados pela interceptação, quantidade de fluxo interceptado pela estrada em cada ponto, o tempo de permanência de atividade em cada ponto após a chuva, o redirecionamento do fluxo interceptado, a confluência de uma forma de interceptação e outra, a contribuição da vazão no canal fluvial com o fluxo subsuperficial interceptado e outros processos observados.

Na sequência (Figura 8) tem-se a localização dos três locais monitorados na BRG e na Figura 9 pode-se observar as características dos locais monitorados. No apêndice, encontra-se uma planilha como ferramenta de auxílio no levantamento de campo para identificação dos locais (pontos de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas).

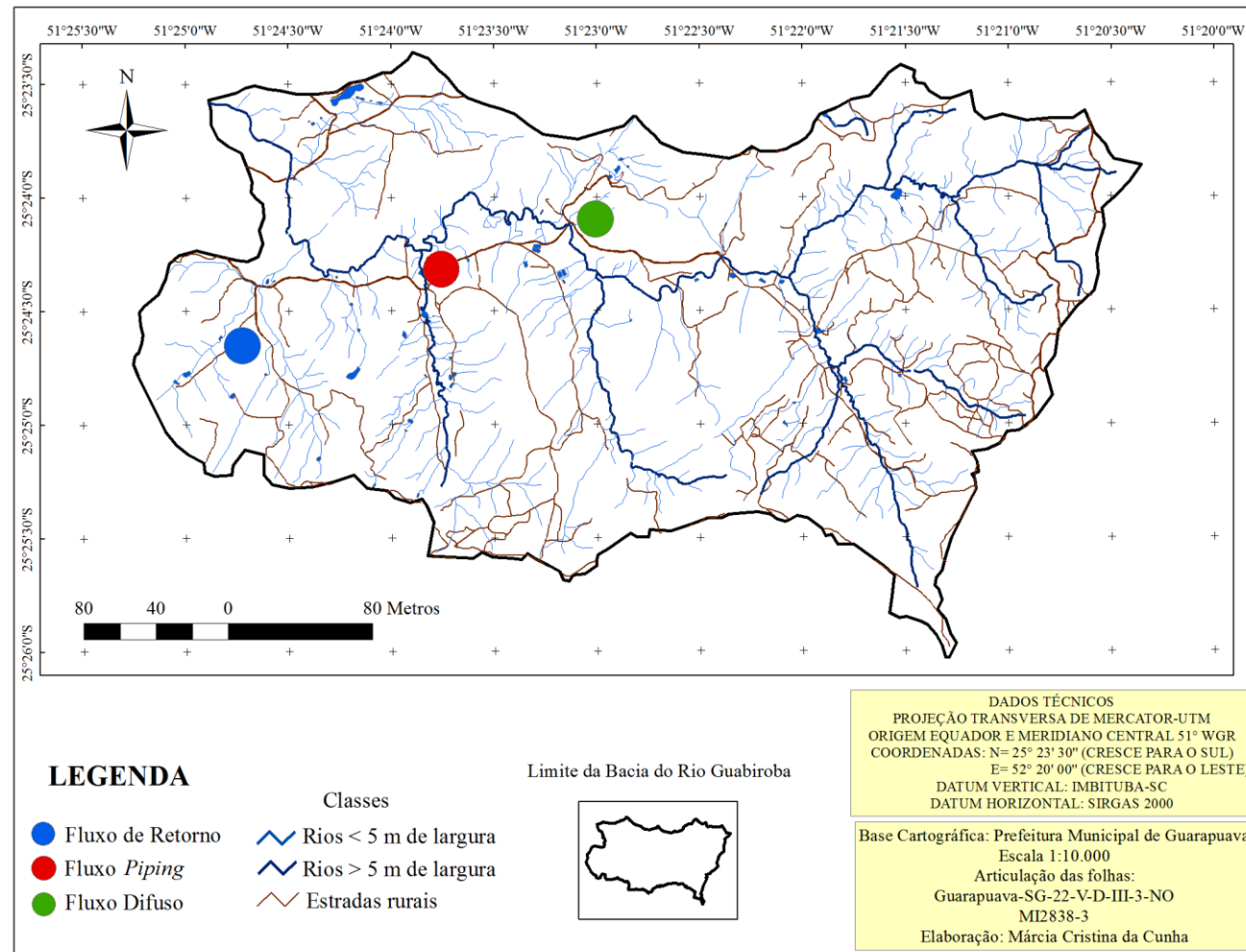


Figura 8- Localização dos três pontos monitorados.

Fonte: Base Cartográfica Prefeitura Municipal de Guarapuava (PMG).

Elaborado pela autora (2014).

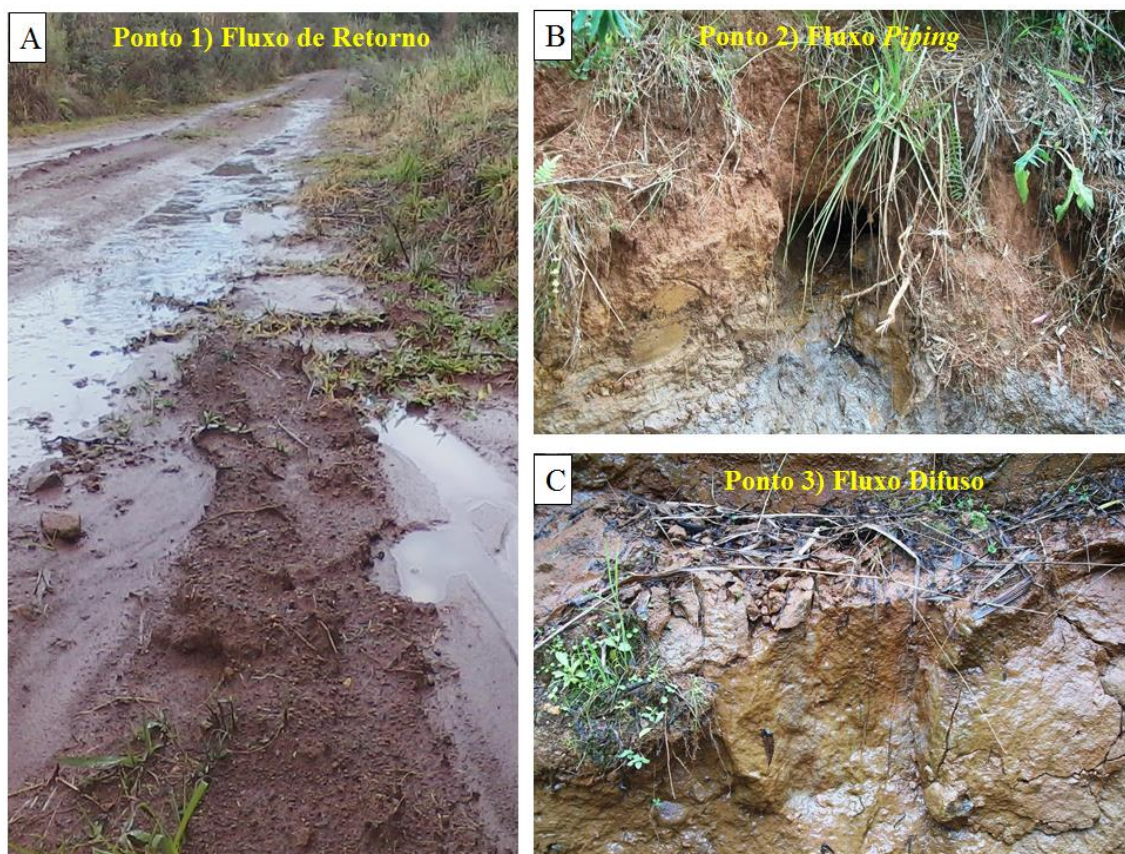


Figura 9- Características dos fluxos subsuperficiais interceptados por estradas não pavimentadas. Em A, Ponto 1) Fluxo de Retorno com 5 cm de espessura da água. Em B, Ponto 2) Fluxo *Piping* com 50 cm de diâmetro e em C, Ponto 3) Fluxo difuso com 0,5 cm de espessura da lâmina d'água no talude da estrada. Organizado pela autora (2014).

4.4 Classificação das formas de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas;

Jairosi (2001) informa que, com relação aos dados geoespaciais, a padronização de simbologia (feições) podem trazer resultados como o crescimento mútuo do entendimento do dado geográfico em diversos usuários colaborando com o processo cognitivo.

Para tanto, os parâmetros abrangidos para a classificação proposta foram baseados na observação direta em campo, assim como na análise dos dados obtidos no monitoramento dos três locais de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas. Os critérios utilizados para a classificação final de cada forma de interceptação do fluxo subsuperficial foram os seguintes:

- a) Estrada (drenagem, largura, localização e estado de conservação);
- b) Chuva (volume, intensidade, duração e frequência);
- c) Vazão (volume máximo registrado em cada ponto de interceptação do fluxo subsuperficial por cortes de estradas);
- d) Processos nos locais de interceptação (umidade do talude, afloramento de água, presença de vegetação, *piping* em atividade e outros indicativos);
- e) Localização (fundo de vale, cortes profundo e exposto do talude da estrada, proximidade com áreas úmidas, média ou alta vertente).

De posse dos dados obtidos, foi possível verificar as especificidades de cada um dos três locais monitorados e, assim, realizar a classificação, isto é, associar o nome de cada ponto monitorado com os processos que neles atuam. Na Tabela 2, tem-se o exemplo de como a classificação final dos três locais monitorados foi realizada. Ressalta-se que a tabela está preenchida na seção dos resultados.

Tabela 2- Tabela utilizada para exemplificar como os locais monitorados foram classificados

Forma de interceptação do fluxo subsuperficial	Processos geradores	Efeitos observados
1- Fluxo de Retorno		
2- Fluxo <i>Piping</i>		
3- Fluxo Difuso		

Dados coletados e trabalhados pela autora (2013-2014).

A classificação final teve como objetivo fazer um maior detalhamento de cada ponto monitorado, com seus processos atuantes e feições. Portanto, essa classificação pode servir como base para ser reproduzida em outras áreas que tenham semelhança com os processos atuantes na área em estudo. Destaca-se, ainda, que as representações constantes no trabalho estão de acordo com as normas contidas no Manual Técnico T 34-700 elaborado pela Diretoria do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (2000).

4.5 Caracterização das unidades hidrogeomorfopedológicas (setores da vertente) nos locais monitorados

Para caracterização das unidades hidrogeomorfopedológicas de cada um dos três pontos escolhidos para monitoramento, foram utilizadas como ferramenta de auxílio a seguinte base cartográfica:

- Carta Topográfica de Guarapuava editada pelo Ministério do Exército, Departamento de Engenharia e Comunicações. Articulação das folhas SG22-V-D-III-3-NO/ MI 2838-3 e a Base Cartográfica da Prefeitura Municipal de Guarapuava (PMG); escala: 1:10.000; (equidistância das curvas de nível: 5 metros); Projeção Transversa de Mercator (UTM); Meridiano Central: 51° W. GR; Datum Vertical: Imbituba-SC, Datum Horizontal: SAD 69 – Chuá-MG; Cobertura aereofotogramétrica: Data do vôo: setembro/2002. Projeto número 647/02, autorização do MD nº 135/02. Convênio Secretaria do Meio Ambiente (SEMAFLOR), Agência Nacional de Águas (ANA), Prefeitura Municipal de Guarapuava, Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), executado por consórcio pela Empresa de Aerofotogrametria Engefoto.
- O mosaico aprimorado para o território brasileiro TOPODATA que é um Guia para Utilização de Dados Geomorfométricos Locais. O TOPODATA utiliza dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) em que o nível do detalhe chega a 30 m, isso pode representar detalhe de até 1:50.000 no terreno em áreas não montanhosas. O nível de detalhes na área de estudo foi de 30 m.

Por meio dessas bases cartográficas e, principalmente, controle de campo, delimitaram-se as formas de relevo em cada um dos três pontos monitorados, como: fundo de vale, média vertente e alta vertente. Essas unidades hidrogeomorfopedológicas são a junções das formas de relevo, declividades e de tipos de materiais predominantes (solos).

De posse da carta de declividade e das formas de relevo, foram realizados trabalhos de campo, para verificar a porcentagem de silte, argila e areia predominante em cada unidade hidrogeomorfopedológica. Para isso analisou-se o tipo de solo existente em cada um dos três pontos monitorados (caracterização física do solo). Foram então coletadas 6 amostras ao todo, sendo duas em cada local monitorado. As profundidades das amostras foram (20 – 40 cm) e (40 – 60 cm) de profundidade.

O método utilizado para coleta das amostras de solo em campo foi por meio de gradagem (Figura 10). As amostras de solo foram acondicionadas em sacos plásticos em quantidade de 200g cada, fazendo-se antes a etiquetagem, anotando as respectivas profundidades dos horizontes, assim como o número do ponto coletado.



Figura 10-Trado utilizado para coleta das amostras de solo.
Fotos da autora (2014).

As amostras foram coletadas no mesmo dia em um período seco, para ter interferência na análise física. Na sequência, as amostras foram enviadas ao laboratório (Tecsolo consultoria e planejamento agrícola) para análise. Mediante os resultados os dados foram tabulados em planilha eletrônica *Calc* do *software BrOffice®*.

Para a caracterização do tipo de solo, foi analisada a textura, cor, estrutura, consistência, drenagem e localização nos diferentes pontos coletados. Para tanto, se utilizou como ferramenta de auxílio a Tabela de *Munsell* que corresponde a um sistema de designação de cores de solo, especificando os graus relativos de três variáveis simples: o matiz, o valor e o croma. A classificação final teve como base o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013).

4.6 Monitoramento da precipitação (duração, intensidade e frequência);

A precipitação é um bom indicativo para compreender como os processos ocorrem em cada um dos pontos interceptados se comportam. Para tanto, foi necessário monitorar os volumes de precipitação na área de estudo, e para isso foram instalados três pluviógrafos próximos aos locais de monitoramento, um em cada ponto monitorado, os mesmos foram fornecidos pelo Laboratório de Erosão dos Solos-UNICENTRO.

Os pluviógrafos são do modelo *Data Logging Rain Gauge RG3-M*, com resolução de 0,2 mm, em que cabem exatamente 373 ml de água no recipiente, e em contato de água com a ponta do balde representa 0,2 mm de chuva (Figura 11). Esse modelo grava automaticamente até 3.200 mm de dados de chuva que foram usados para determinar as taxas de precipitação, horários e duração. O pluviógrafo vem acompanhado com o *software HOBOWare Pro* em que os dados foram tabulados para análise posterior.



Figura 11- Pluviógrafos instalados na bacia do Rio Guabiroba. Fotos da autora (2014).

Os pluviógrafos foram instalados nos seguintes pontos: Pluviógrafo 1, coordenadas Latitude Sul 25° 24' 55'' Longitude Oeste 51° 24' 28'', Pluviógrafo 2 coordenada Latitude Sul 25° 24' 20'' Longitude Oeste 51° 23' 09'', Pluviógrafo 3, coordenada Latitude Sul 25° 24' 29'' Longitude Oeste 51° 21' 52'' (Figura 12).

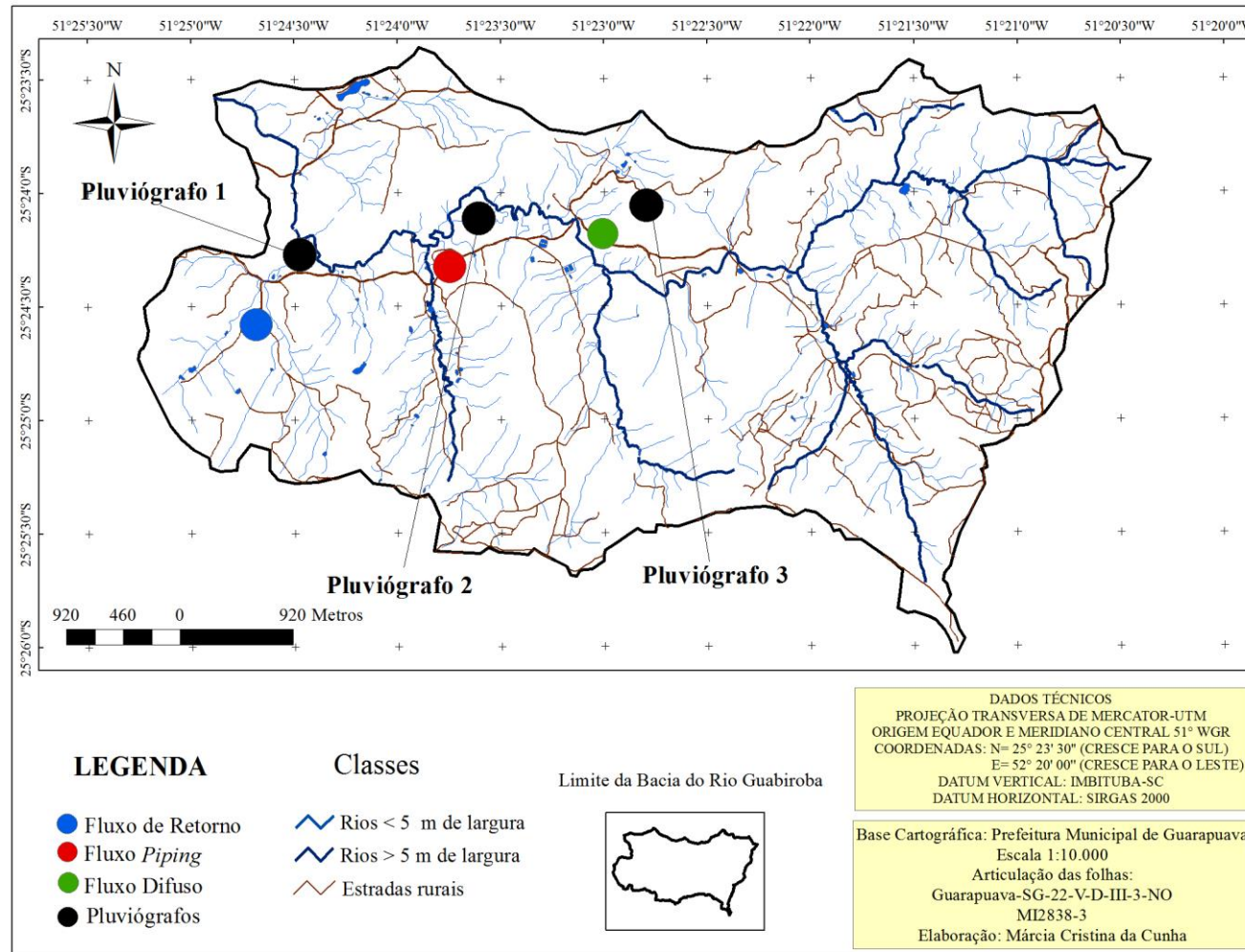


Figura 12- Localização dos pluviógrafos.

Fonte: Base Cartográfica Prefeitura Municipal de Guarapuava (PMG).
 Elaborada pela autora (2014).

O objetivo dessa localização foi registrar as chuvas em cada ponto monitorado. Os equipamentos foram instalados em um suporte de madeira, em média 1,50 m de altura, longe de qualquer objeto que pudesse causar interferência no monitoramento. Contudo, para o monitoramento dos eventos foram imprescindíveis trabalhos de campo, durante e após os eventos pluviométricos.

O intervalo de tempo escolhido para monitoramento da chuva foi de 1 minuto, ou seja, cada intervalo de 1 minuto de chuva, os volumes pluviométricos foram registrados. Os dados coletados foram separados por dias com chuva, sem chuva, chuvas consecutivas (frequência) e intensidade, sendo estas: fraca, moderada e forte. Os eventos de chuva foram separados por volume pluviométrico total mês a mês, duração e intensidade, média e desvio padrão.

Para classificação de duração, frequência e intensidade da chuva, foi utilizado a metodologia proposta por Minuzzi e Sediama (2004, p.4), baseado na Organização Meteorológica Mundial, que utilizaram as seguintes classes de intensidade de chuva: chuva fraca: 1,1 mm/h até 5 mm/h; chuva moderada: 5,1 mm/h até 25 mm/h; chuva forte: 25,1 mm/h até 50 mm/h e chuva muito forte: acima de 50,1 mm/h.

O período de monitoramento apresentado, neste trabalho, foi do dia 21/05/2014 ao dia 31/08/2015, ou seja, um ano e três meses de monitoramento. Neste período foram registrados 79 eventos pluviais.

4.7 Monitoramento da vazão máxima nos pontos de interceptação do fluxo subsuperficial

Para a realização do monitoramento da vazão máxima nos pontos de interceptação do fluxo subsuperficial causado pelas estradas não pavimentadas, foram instaladas 3 Calhas Parshall uma em cada ponto monitorado (1- Fluxo de Retorno, 2- Fluxo *Piping* e 3- Fluxo Difuso) ambas fornecidas pelo Laboratório de Erosão dos Solos-UNICENTRO. Entretanto, foi instalada também uma calha auxiliar no canal de 2ª ordem para verificar a contribuição do fluxo subsuperficial interceptado pela estrada. O objetivo do monitoramento por meio das calhas foi verificar o volume do fluxo subsuperficial interceptado em cada um dos três pontos monitorados.

Essas calhas são dispositivos de medição de vazão na forma de um canal aberto com dimensões padronizadas. A água é forçada por uma garganta estreita, sendo que o nível da água, a montante da garganta, é o indicativo da vazão a ser medida, essa

medição é feita por meio de um medidor de nível externo com escala graduada (INCONTROL S/A, 2008).

A dinâmica do funcionamento da calha é o seguinte: em sua entrada há um trecho convergente (0 – 1), um trecho contraído em declive na seção constante (1 – 2), e na saída um trecho divergente em auge (2 – 3). O trecho convergente, também chamado de crista, produz um nível, no líquido medido, que está diretamente relacionado com a vazão. Com auxílio de um medidor de nível externo (Hq) adequado, podemos obter leituras de vazão (INCONTROL S/A, 2008) conforme Figura 13.

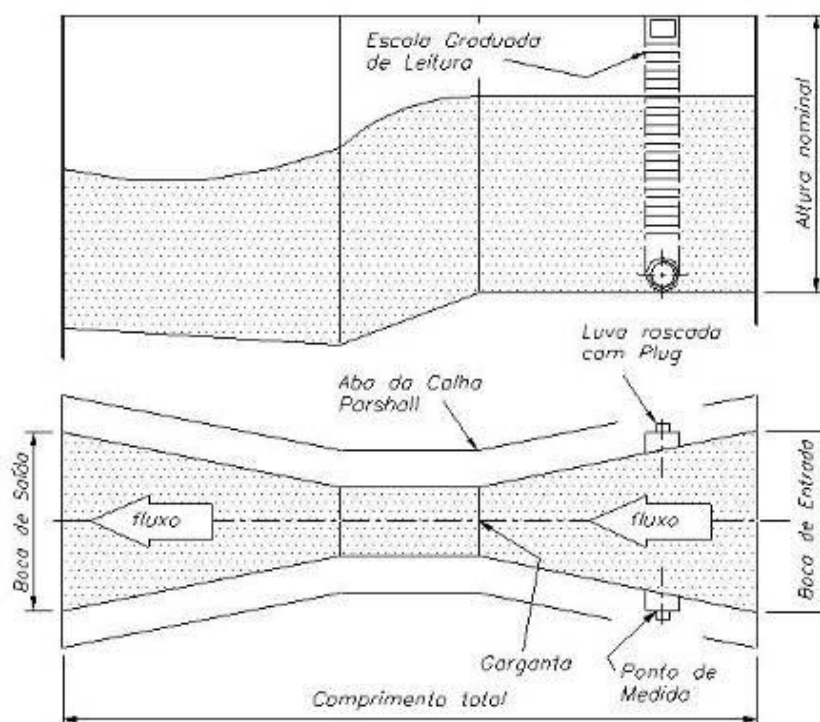


Figura 13- Dinâmica do funcionamento das Calhas Parshall.
Fonte: INCONTROL S/A (2008).

As calhas são fabricadas em fibra de vidro, uma delas tem garganta de 9” polegadas (calha 1), com vazão mínima de 10 m³/h e vazão máxima de 925 m³/h instalada no canal de 2ª ordem. A calha 2 e 4 têm garganta de 2” polegadas, com vazão mínima de 1 m³/h e vazão máxima de 60 m³/h, instaladas para medir o ponto 1- Fluxo de Retorno e o fluxo 3- Difuso. A calha 3 tem garganta de 6” polegadas, com vazão mínima de 5 m³/h e vazão máxima de 400 m³/h instalada para medir o fluxo na forma 2- *Piping* (Figura 14). Entretanto, no final, para melhorar o entendimento do leitor os valores de vazão foram convertidos de m³/h para L/s.

Ressalta-se que nos locais monitorados é gerado também quantidade significativa de fluxo superficial, portanto o monitoramento dos picos de vazão ocorreu após o término da precipitação (15 a 20 min), para assim conseguir separar o fluxo superficial do fluxo subsuperficial. A vazão monitorada foi o pico máximo atingido pela lâmina d'água em eventos de chuva em um período de 24 horas, ou seja, a vazão monitorada foi a altura máxima que a água alcançou na calha. A localização da instalação de cada calha se deu em função da observação do volume do fluxo em cada ponto a ser monitorado (Figura 15).



Figura 14- Calhas instaladas para monitoramento da vazão máxima em estradas não pavimentadas na bacia do Rio Guabiroba. A calha 1 está localizada no rio de segunda ordem, a calha 2 está localizada para monitorar o fluxo subsuperficial no ponto 1) Fluxo de Retorno, a calha 3 está localizada para monitorar o fluxo subsuperficial no ponto 2) Fluxo *Piping* e a calha 4 está localizada para monitorar o fluxo subsuperficial no ponto 3) Fluxo Difuso. Fotos da autora (2014).

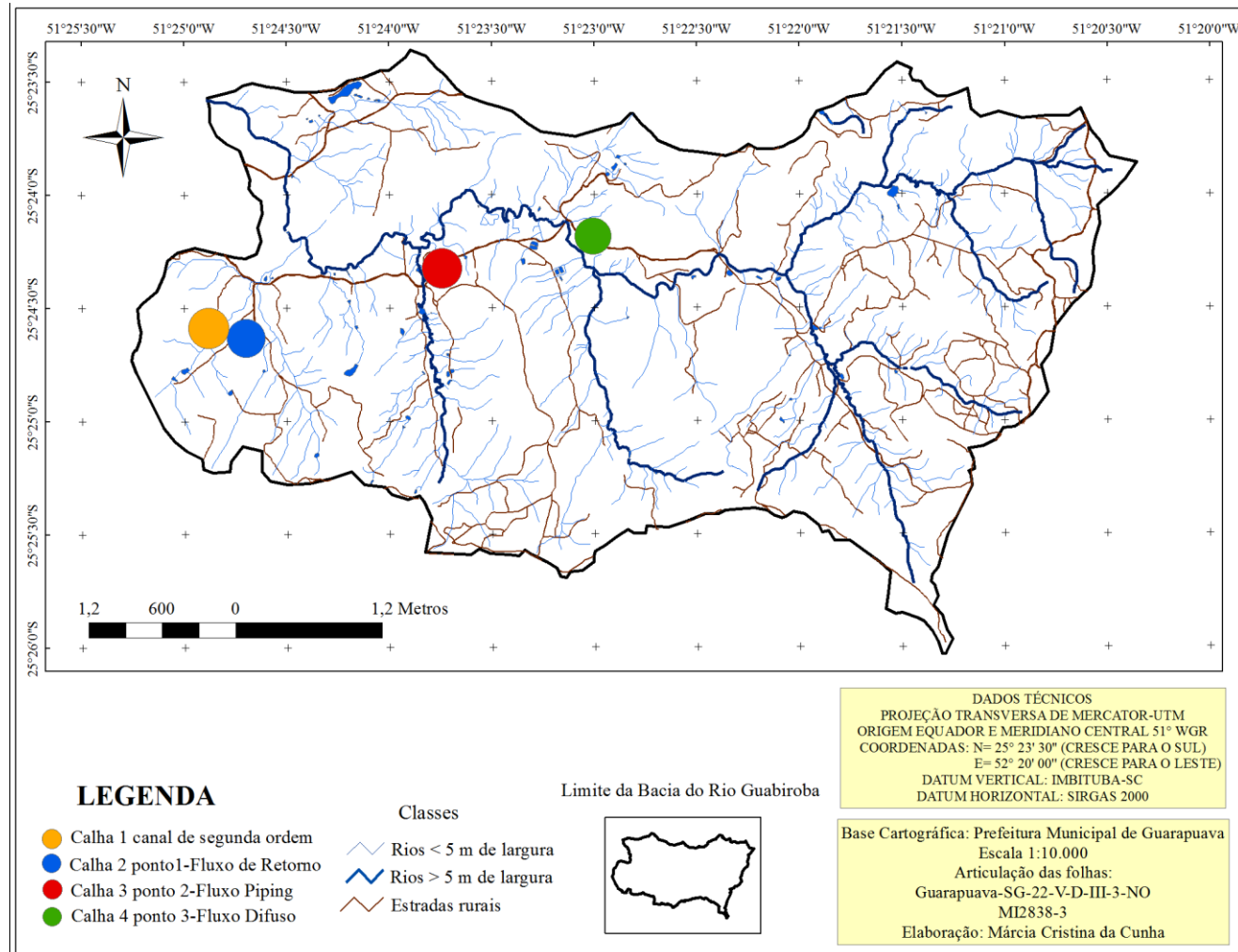


Figura 15- Localização de implantação das calhas.

Fonte: Base Cartográfica Prefeitura Municipal de Guarapuava (PMG).
Elaborada pela autora (2014).

Para instalação das calhas houve a necessidade de confinar água, utilizando suporte de madeira e concreto para que toda a água escoada no local de interceptação passasse na calha para realização da medição de vazão máxima. Porém, diante da dificuldade em realizar os monitoramentos de vazão máxima durante as chuvas noturnas ou em situações em que não fosse possível ir até o local de monitoramento, utilizou-se, para auxiliar nas mensurações, a régua fluviométrica de vazão máxima que registra a maior altura alcançada pela lamina d'água.

A régua é um equipamento com dispositivos para a coleta de água fixada na vertical, a qual capta o nível máximo que a lâmina d'água atinge. A régua fluviométrica foi confeccionada em uma estaca de madeira com mangueiras coletoras (tubos) acopladas uma acima da outra, com uma régua graduada junto a ela. Ela registra a cota máxima atingida pelo nível do fluxo interceptado por meio dos tubos transparentes, os quais têm 0,7 cm de diâmetro por 3 cm de comprimento. Cada tubo capta a água do pico de cheia, indicando, assim, o nível máximo que a lâmina d'água atingiu, facilitando a medição da vazão quando o observador não estiver presente. Foi confeccionado também em cano de PVC, com 75 mm de diâmetro, um recipiente que armazena água para facilitar o registro da vazão nos picos de cheia. Esse recipiente foi fabricado com copos plásticos de 2 cm de diâmetro por 1 cm de altura cada.

As régua foram instaladas à montante das calhas Parshall, alinhada à régua graduada medidora de vazão máxima de cada calha. Tomou-se o cuidado de confeccionar os tubos e o cano de PVC alinhados um a outro no sentido vertical para que não captasse água da chuva e somente o fluxo de água no ponto da estrada monitorada, ou seja, esse recipiente tem um suporte (tampa) que o isenta da entrada da água da chuva para não prejudicar a leitura da vazão máxima. Os eventos de vazão foram separados por volume de L/s total mês a mês, média e desvio padrão.

O período de monitoramento foi do dia 19/09/2014 a 31/08/2015, ou seja, um ano de monitoramento. Neste período foram registrados 60 eventos de vazão máxima (L/s).

4.8 Monitoramento da profundidade do nível do lençol freático a partir da superfície do solo nos pontos de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas por meio de piezômetro

Em cada um dos três pontos de interceptação do fluxo subsuperficial ocasionado por cortes de estradas foi instalado um piezômetro. O objetivo desse monitoramento foi

verificar a resposta da profundidade do nível do lençol freático a partir da superfície do solo em cada ponto monitorado após a precipitação. O piezômetro 1 foi instalado no ponto 1- Fluxo de Retorno, o piezômetro 2 foi instalado no ponto 2- Fluxo *Piping* e, por fim o piezômetro 3 foi instalado no ponto 3- Fluxo Difuso.

Os piezômetros foram confeccionados em canos de PVC com 40 mm de diâmetro. Em cada local foi utilizado o trado para a execução dos furos de sondagem. Antes de iniciar a instalação do piezômetro, foi necessário preparar o cano PVC utilizado para a confecção do instrumento. Para isso, foram feitos pequenos orifícios (furos) para a passagem de água sobre o cano PVC, já com seu comprimento estabelecido por prévios estudos da posição da linha freática. Em torno dos orifícios, foi colocada de duas a três camadas de geotêxtil, permitindo a passagem de água e impedindo a passagem de partículas de solo ou de areia. Também se coloca, nessa etapa, as conexões no cano PVC, como as tampas na parte inferior (colada) e superior (rosqueável), permitindo o monitoramento posterior, e possibilitando o isolamento do tubo.

Após a preparação do cano PVC, foi feito um furo de sondagem até alcançar a profundidade desejada (aproximadamente 1 m num diâmetro 45 mm) que possibilitou a instalação do tubo. Atingida a profundidade, colocou-se na parte inferior do furo uma pequena camada de areia média lavada, apoiando sobre essa camada o tubo já montado (Figura 16).



Figura 16- Instalação dos piezômetros para monitoramento do nível do lençol freático nos 3 pontos de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas. Fotos da autora (2015).

A leitura do nível de água foi realizada por meio de uma régua acoplada a um suporte de madeira com 8 mm de diâmetro. Associado à régua foi colocado um tubo transparente, os quais têm 0,7 cm de diâmetro, permitindo, assim, verificar exatamente o nível do lençol freático no momento da coleta. Os eventos do nível do lençol freático foram separados por total mês a mês, evento diário, média e desvio padrão.

A leitura da profundidade do nível do lençol freático a partir da superfície do solo foi realizada em média uma hora após o término da precipitação. O período do monitoramento por meio dos piezômetros foi de 01/04/2015 até 31/09/2015, ou seja, cinco meses de monitoramento, totalizando assim 19 eventos monitorados (registrados).

Ressalta-se que o período de monitoramento da chuva, vazão e o nível do lençol freático ocorreu em períodos diferentes em virtude da disponibilidade do equipamentos e principalmente pela importância do monitoramento compreender um período seco e outro chuvoso. Contudo, essa diferença entre o período de monitoramento não prejudicou na interpretação e análise dos dados.

4.9 Relação dos dados de precipitação, profundidade do nível do lençol freático e vazão máxima em cada forma de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes de estradas

Os dados analisados foram precipitação (mm), vazão máxima (L/s) e a profundidade do nível do lençol freático (cm) nos pontos de interceptação do fluxo subsuperficial por cortes de estradas. A técnica de análise utilizada para avaliação dos dados de precipitação, vazão máxima e o nível do lençol freático foi a estatística descritiva que compreende a coleta, a organização e a simplificação de informações. Os resultados das análises foram apresentados por meio de figuras, gráficos e tabelas.

Também foi utilizada técnica de análise de regressão simples, que é baseada numa relação linear entre a variável dependente e a variável independente. Os valores permitiram determinar o coeficiente (R^2) ao nível de 0,05% de significância com a dispersão dos dados avaliados.

Os eventos de chuva (mm) foram separados por volume pluviométrico total mês a mês, duração e intensidade, média e desvio padrão. Os eventos de vazão máxima (L/s) foram separados por volume total mensal, média e desvio padrão. E os eventos da profundidade do nível do lençol freático foram separados por evento total diário e total mensal, permitindo, assim, obter a correlação entre os volumes de chuva (mm), nível do lençol freático (cm) e vazão máxima (L/s), nos pontos monitorados. Por último foi utilizado também o teste não paramétrico *Mann-Whitney* ao nível de 0,05% de significância para comparar a mediana das variáveis hidrológicas.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5 RESULTADOS

5.1 CARACTERÍSTICAS DA REDE DE DRENAGEM E REDE VIÁRIA DA BACIA DO RIO GUABIROBA

A BRG possui área de 24 km², sendo 10,8 km de extensão da nascente do Rio Guabiroba até sua foz, em escala de 1:10.000. O comprimento total dos cursos fluviais (Lt) somam 178,22 km, em que os rios perenes representam 84,86 km. A rede viária da bacia é composta somente de estradas não pavimentadas e soma um total de 130 km (Figura 17).

Na bacia em estudo, a densidade de drenagem é de 3,5 km/km². De acordo com Villela e Mattos (1975), a densidade de drenagem varia de 0,5 km/km² em bacias de drenagem baixa a 3,5 km/km² ou mais, em bacias bem drenadas, ou seja, a BRG caracteriza-se como bem drenada. No presente trabalho foram considerados apenas os rios perenes para o cálculo da densidade de drenagem.

As estradas influenciam na densidade de drenagem de uma bacia quando se compara a drenagem natural e a rede de circulação viária. Por sua vez, a densidade de estradas é de 5,4 km/km², ou seja, maior do que a rede de drenagem natural. Somando-se a rede drenagem natural e a rede viária, a extensão atinge 214,46 km, aumentando a densidade para 8,9 km/km². Portanto, com acréscimo da densidade total e a inclusão das estradas foi 60% superior de quando se considerou apenas a drenagem natural.

A extensão do fluxo superficial representa a distância média percorrida pelas enxurradas entre o interflúvio e o canal permanente (HORTON, 1945), sendo na BRG, de 142 m, considerando somente a rede de drenagem existente e de 99 m, quando se considera a rede viária. Assim, a extensão do fluxo superficial da rede viária é 41% superior quando se considera as estradas não pavimentadas.

No total foram observados 41 cruzamentos de estradas e rios perenes, porém quando considerados os rios intermitentes em dez pontos selecionados aleatoriamente ao longo da bacia, foram estimados para os cursos d'água em média $2,4 \pm 1,34$ / km² cruzamentos (estrada e rio) em relação ao valor da média de cruzamentos. Considerando que a área da bacia é de 24 km², estima-se que o número total de cruzamentos de estradas não pavimentadas com os rios seja de 58 cruzamentos.

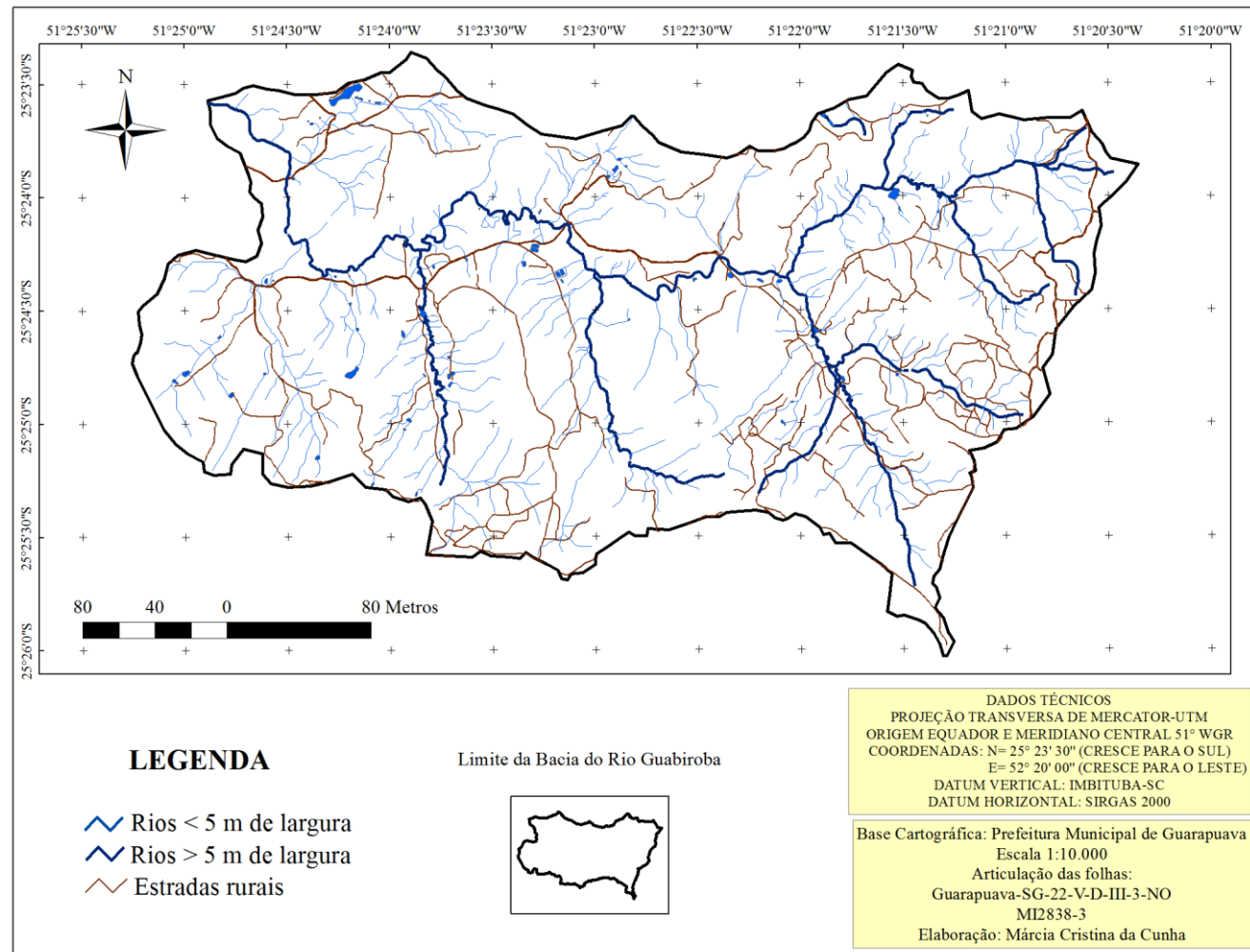


Figura 17- Rede drenagem e rede viária da bacia do Rio Guabiroba.

Fonte: Base cartográfica da Prefeitura Municipal de Guarapuava (PMG).
 Elaborado pela autora (2014).

De maneira geral, as estradas da BRG possuem largura média de $4,16 \pm 0,52$ m, ravinamento no sentido transversal e longitudinal da faixa de rolamento, com disponibilidade de material solto para ser transportado. A maioria das estradas observadas não possuem dissipadores de energia e foram abertas pelos colonizadores, sem técnicas de implantação apropriada, por terem sido orientadas pela estrutura fundiária e pelas facilidades do terreno, originando, assim, pequenas trilhas e caminhos de acesso.

Cunha (2011) classificou as estradas não pavimentadas como sendo (1) primárias (2) secundárias e (3) terciárias ou carreadores. As estradas primárias são as que possuem em média 6 m de largura, as estradas secundárias são as que possuem em média 4 m de largura e as estradas terciárias ou caminhos internos são as que possuem em média 2,5 m de largura. As estradas primárias (principais), geralmente, acompanham os cursos dos rios, no entanto, as estradas secundárias foram construídas em todas as unidades hidrogeomorfopedológicas da bacia, muitas vezes não levando em consideração a aptidão do terreno. Já os caminhos internos e carreadores foram construídos entre as propriedades para facilitar o deslocamento das pessoas (Figura 18).



Figura 18- Estradas não pavimentadas presentes na bacia do Rio Guabiroba. Fotos da autora (2013).

Nas condições em que as estradas não pavimentadas foram construídas na BRG, sendo inicialmente implantadas pelos colonizadores e, posteriormente, manuseadas pelos moradores locais, ocasionaram problemas como rampas acentuadas de difícil trafegabilidade, encostas instáveis e de difícil manutenção, expondo, muitas vezes, perfis do solo susceptíveis à erosão. Como consequência, ocorrem estradas encaixadas na encosta, taludes expostos, pistas sem controle de drenagem superficial e subsuperficial, ausência de vegetação em áreas de entorno, cruzamentos de estradas e rios, potencializando a degradação tanto da estrada como do canal fluvial.

Na BRG, o leito das estradas é composto por solos argilosos, o que gera os problemas em épocas de chuva, como por exemplo, a formação de atoleiros e de pista escorregadia (Figura 19). Nos solos argilosos, o fluxo subsuperficial associado à chuva, sem um sistema de drenagem adequado, favorece a formação dos atoleiros.



Figura 19- Atoleiro e pista escorregadia na bacia do Rio Guabiroba. Foto da autora (2013).

Dessa forma, a implantação das estradas na BRG se deu de forma inadequada, em que os problemas instalados são de longa data, intensificando ainda mais à medida que existe uma carência de manutenção periódica e também a ausência de sistemas de drenagem adequados.

5.2 CLASSIFICAÇÃO DAS FORMAS DE INTERCEPTAÇÃO DO FLUXO SUBSUPERFICIAL POR ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS NA BACIA DO RIO GUABIROBA

A classificação dos processos da interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes de estradas, teve como principal fundamento a observação direta em campo. Assim sendo, para a classificação das formas de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas foram levados em consideração os principais processos e efeitos observados em campo como, por exemplo, estado de conservação da estrada, drenagem, afloramento de água, presença de vegetação, dutos em atividade, e outros indicativos da interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas.

Portanto, com os dados obtidos por meio das observações antes destacadas propôs-se a classificação de cada forma (feição) de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas:

1- Processo de Fluxo de Retorno: é a interceptação de fluxo subsuperficial que ocorre em lençol freático raso ou áreas saturadas/fluxo de retorno próximo à rede de drenagem. Como resultado de uma ação combinada da exfiltração e do fluxo subsuperficial, foi observada a formação de uma camada saturada a pouca profundidade (3 a 15 cm de espessura) próxima aos cursos fluviais e nos vales com pequena declividade (Figura 20a).

2- Processo de Fluxo *Piping*: é a interceptação de fluxo subsuperficial pontual relacionada à captura de drenagem subterrânea particularmente “*piping*” ou dutos. Os *piping* são cavidades no solo, com caminhos preferenciais favorecendo a passagem da água com canais de drenagem tubulares no interior do solo. Esses dutos interligados são formados pela ação erosiva dos escoamentos subsuperficiais que arrastam os sedimentos e também da atividade da fauna e flora. Esses *pipings* variaram de 1 a 50 cm de diâmetro cada. Os mesmos foram encontrados paralelos ao talude da estrada (Figura 20b).

3- Processo de Fluxo Difuso: é a interceptação de fluxo subsuperficial difuso (não pontual) devido à interceptação da água paralela à vertente, formando uma lâmina d'água em média 1 a 3 cm de espessura. Este tipo de fluxo tende a seguir lateralmente os barrancos (cortes mais profundos da estrada) em média 300 metros no sentido longitudinal. Esse tipo de fluxo subsuperficial responde às mudanças nos gradientes hidráulicos resultando em escoamento paralelo ao talude da estrada (Figura 20c).



Figura 20- Formas de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas. Fotos da autora (2013/2014).

Por meio das observações diretas em campo foi possível notar que os processos da interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas se distribuem em diferentes unidades da BRG, entretanto, em alguns locais são mais frequentes do que outros. Na Tabela 3, têm-se os principais processos e os efeitos observados na classificação das formas de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas.

Tabela 3- Principais processos e efeitos observados para classificar as formas de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas

Forma de fluxo interceptado	Processos geradores	Efeitos observados
1- Fluxo de Retorno	Exfiltração da água em solo saturado	Camada saturada próxima ao rio (fundo de vale)
2- Fluxo <i>Piping</i>	Infiltração e percolação da água no solo em forma de duto	Duto em atividade no talude da estrada
3- Fluxo Difuso	Exfiltração da água devido a mudança do gradiente hidráulico	Água exfiltrada paralela ao talude da estrada

Dados coletados e trabalhados pela autora (2016).

A uniformidade do gradiente topográfico pode beneficiar o sentido da direção do fluxo. Nos três pontos monitorados foi possível identificar um sentido preferencial do movimento da água, mas não um caminho preferencial para o deslocamento em que esse tipo de fluxo se expande vertente abaixo. Como resultado ocorreram processos erosivos na vertente e na estrada.

Foi observado que os processos atuantes em cada uma das três formas monitoradas (ponto 1- Fluxo de Retorno, ponto 2- Fluxo *Piping*, e ponto 3- Fluxo Difuso) responderam de forma distinta em relação à localização física do terreno (Figura 21), ou seja, cada um dos três pontos monitorados apresentou características específicas em relação a caracterização do solo, setor da vertente, declividade, forma do terreno, sistema de drenagem e direção do fluxo subsuperficial interceptado (Figura 22).

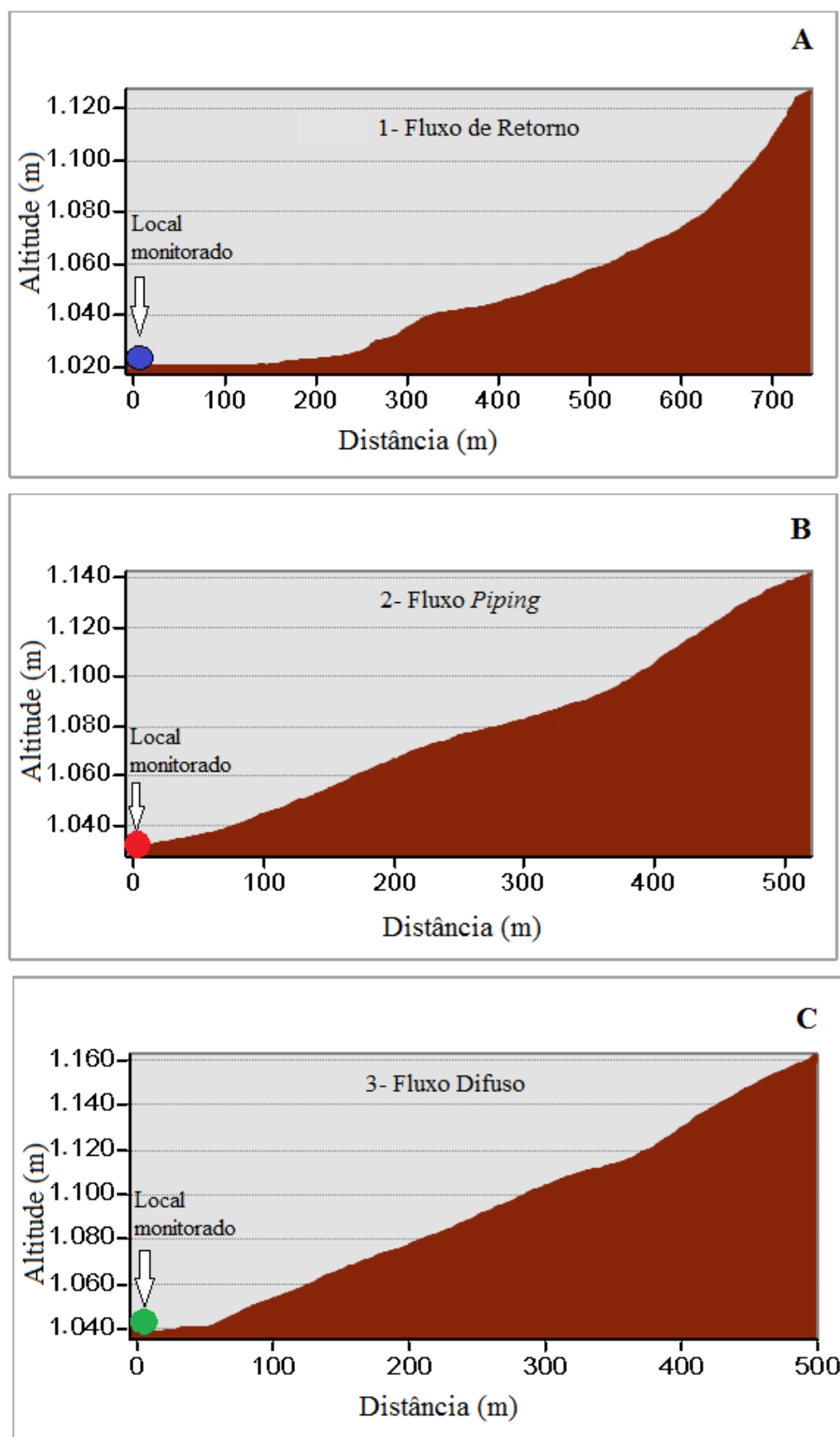


Figura 21- Perfil topográfico dos três locais de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes de estradas não pavimentadas.

Nota: Cada perfil representa a distância do local monitorado até o divisor de água, com suas respectivas altitudes.

Organizado pela autora (2016).

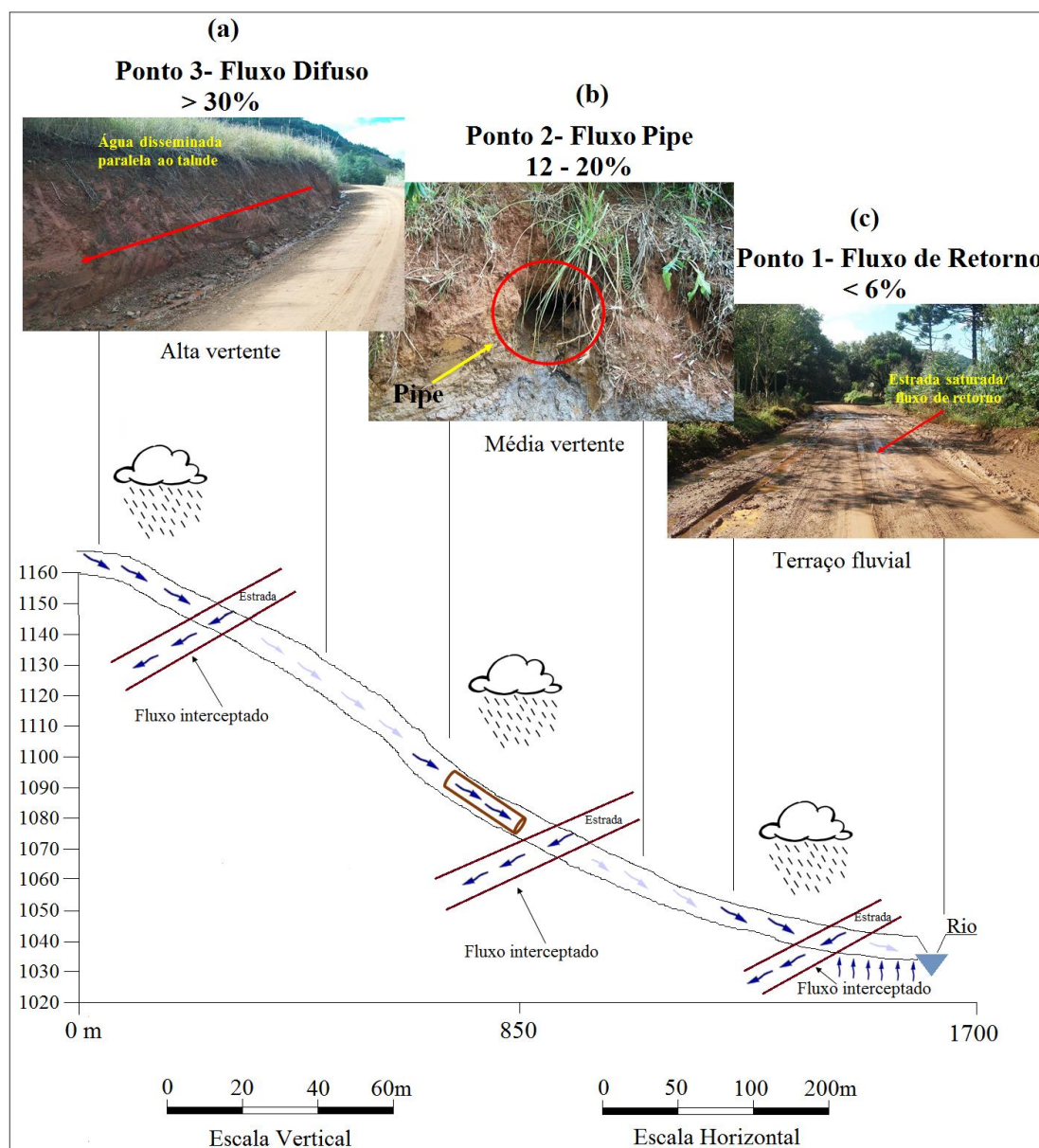


Figura 22- Unidades geomorfopedológicas, de acordo com o setor de vertente e a declividade de cada setor monitorado.

Elaborado pela autora (2016).

Na área de estudo o fluxo interceptado pelos cortes das estradas não pavimentadas é redirecionado, e em alguns casos formam um novo canal efêmero e intermitente no sentido longitudinal da estrada e em outras situações o fluxo subsuperficial fica abandonado em um trecho, uma vez que já foi interceptado. Nas Figuras 23, 24 e 25 tem-se três exemplos observados ou possíveis de ocorrer, de como os fluxos subsuperficiais podem ser interceptados por estradas não pavimentadas presentes na BRG. Nessas três situações, as estradas não pavimentadas presentes alteram os processos naturais do fluxo subsuperficial.

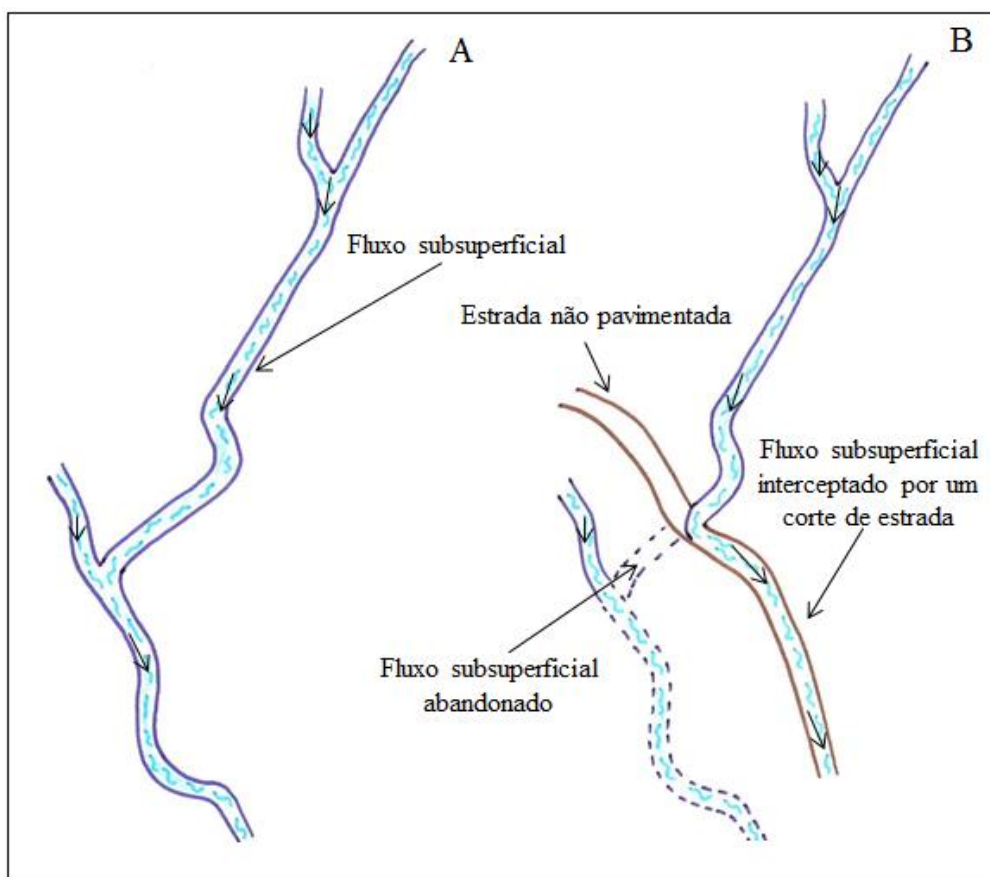


Figura 23- Interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas não pavimentadas presentes na bacia hidrográfica do Rio Guabiroba. Em A, processo natural do fluxo subsuperficial, em B processo alterado do fluxo subsuperficial por cortes da estrada. Organizado pela autora. Arte: Mariane Mártire Bossoni (2015).

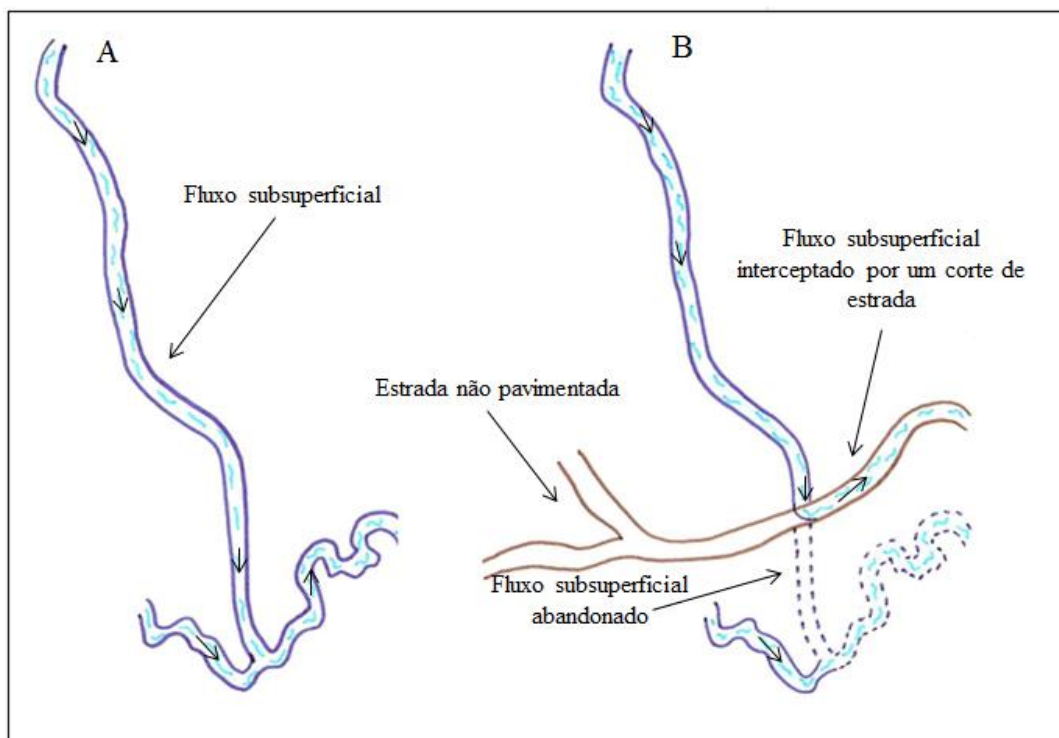


Figura 24- Intercepção do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas não pavimentadas presentes na bacia hidrográfica do Rio Guabiroba. Em A, processo natural do fluxo subsuperficial, em B processo alterado do fluxo subsuperficial por cortes da estrada. Organizado pela autora. Arte: Mariane Mártire Bossoni (2015).

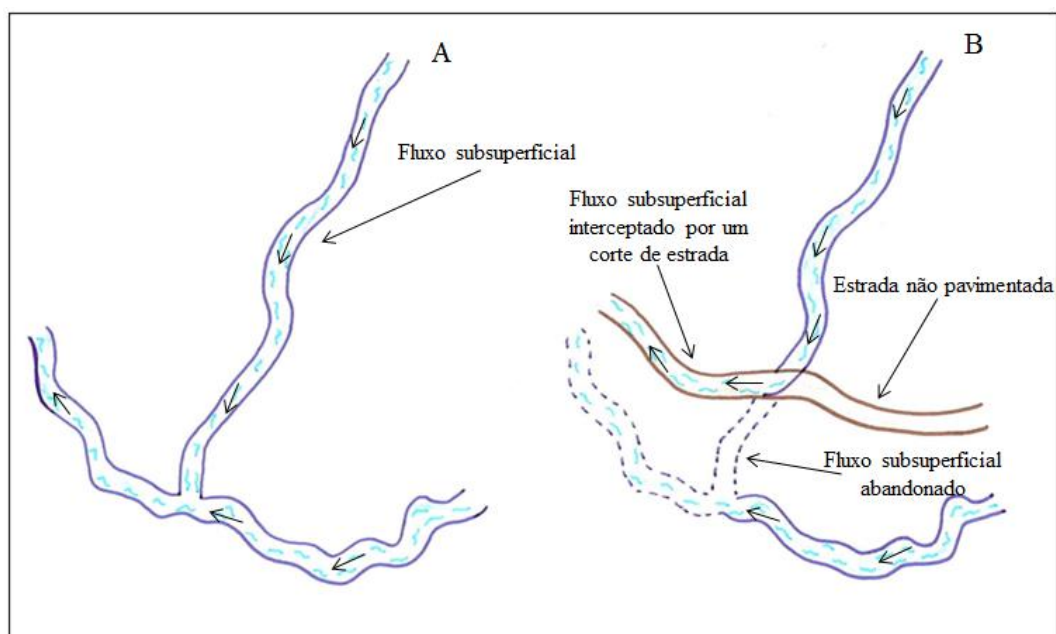


Figura 25- Intercepção do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas não pavimentadas presentes na bacia hidrográfica do Rio Guabiroba. Em A, processo natural do fluxo subsuperficial, em B processo alterado do fluxo subsuperficial por um corte de estrada. Organizado pela autora Arte: Mariane Mártire Bossoni (2015).

5.3 DISTRIBUIÇÃO E DINÂMICA DO FLUXO SUBSUPERFICIAL INTERCEPTADO POR ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

No total de 130 km de estradas não pavimentadas percorridos, foram registrados ao todo 20 locais de interceptação na BRG, com três processos distintos, ou seja, desses 20 locais observados, três formas diferentes de interceptação se destacaram. As formas foram denominadas (classificadas) de: 1- Fluxo de Retorno, 2- Fluxo *Piping* e 3-Fluxo Difuso.

Esses 20 locais de interceptação se distribuem em todos os setores da BRG (Tabela 4). Contudo, nas áreas próximas aos canais fluviais, a interceptação do fluxo subsuperficial causada por cortes de estradas não pavimentadas se concentram mais. Por sua vez, o tempo de permanência de fluxos interceptados variou em média de 8 a 15 dias após o cessar da precipitação e, em alguns casos, quando o tempo de intervalo de precipitação foi inferior a esse período, o fluxo interceptado permaneceu constante entre uma precipitação e outra.

Tabela 4- Localização e características dos 20 locais de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes de estradas não pavimentadas

Processo de interceptação do fluxo subsuperficial	Localização da interceptação do fluxo subsuperficial	Declividade média da vertente no local do fluxo interceptado	Total dos locais de interceptação observados	Tempo de fluxo em dias consecutivos após a chuva	Vazão média máxima (L/s)	Nível médio da profundidade do lençol freático (cm)
1- Fluxo de Retorno	Fundo de vale, ou próximo a áreas úmidas.	< 6%	7	15	8	42,2
2- Fluxo <i>Piping</i>	Taludes mais profundos das estradas não pavimentadas em média vertente.	12-20%	5	10	26,3	31,2
3- Fluxo Difuso	Difundindo lateralmente no talude da estrada não pavimentada em alta vertente.	> 30%	8	8	8,6	29,6
TOTAL	—	—	20	—	14,3	34,3

Dados coletados e trabalhados pela autora (2016).

Na Figura 26, observa-se a localização dos 20 pontos que foram mensurados (registrados) com a interceptação do fluxo subsuperficial na BRG e as três formas distintas de cada processo.

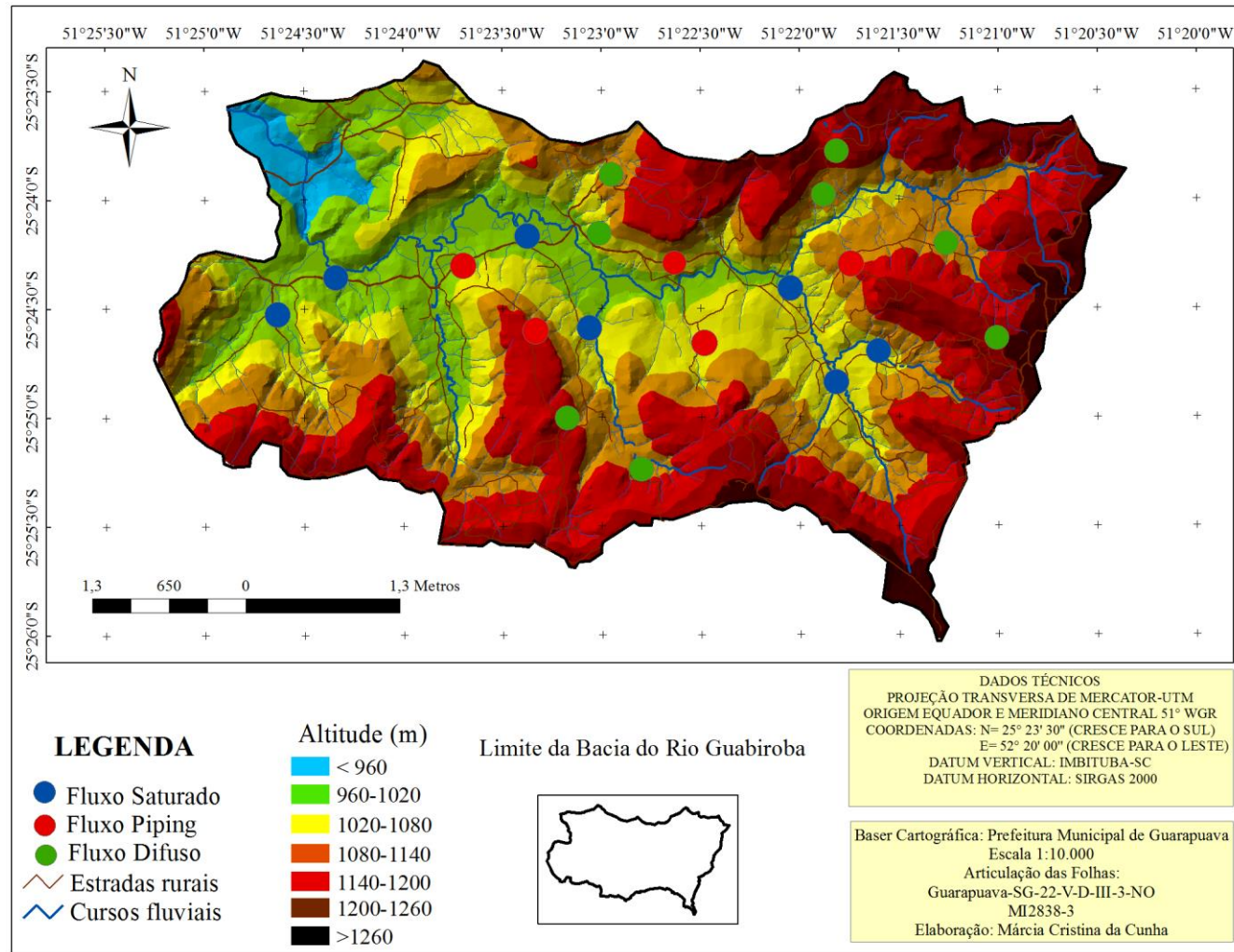


Figura 26- Locais de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas na bacia do Rio Guabirola.

Fonte: Base cartográfica da Prefeitura Municipal de Guarapuava (PMG).

Elaborado pela autora (2016).

A partir desses dados, foi observado, ainda, que, em alguns casos, o fluxo interceptado pela estrada é redirecionado para o canal fluvial receptor mais próximo e, às vezes, forma um canal efêmero ou intermitente no sentido longitudinal da estrada não pavimentada (Figura 27). Nessa situação, evidencia-se que o fluxo subsuperficial interceptado percorre o sentido longitudinal da estrada em um declive natural potencializando a vazão do canal receptor.



Figura 27- Interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas. Em A, redirecionamento do fluxo interceptado pela estrada para o canal receptor e em B, canal efêmero no sentido longitudinal da estrada.

Fotos da autora (2016).

Ressalta-se, também, que os 20 locais registrados da interceptação do fluxo subsuperficial causado por estradas não pavimentadas servem como elo, isto é, como conectoras do fluxo subsuperficial, ligando, assim, de forma mais rápida vertente e rio e, principalmente, alterando a direção do fluxo subsuperficial interceptado. Portanto, o monitoramento dos locais de interceptação foi realizado para compreender a dinâmica dos processos atuantes.

5.4 MONITORAMENTO DOS PONTOS DE INTERCEPTAÇÃO DO FLUXO SUBSUPERFICIAL POR ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

Após a identificação e classificação das formas de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes de estradas, dos 20 locais identificados foram escolhidos três (3) pontos (locais) para monitoramento (Figura 28). A escolha dos três locais de monitoramento se deu em função de logística da impossibilidade de monitorar os 20 locais de processo de interceptação do fluxo subsuperficial ocasionado por estradas não pavimentadas. Dessa forma, foi possível monitorar os processos atuantes em cada uma das três formas observadas. Na Figura 29, a localização detalhada dos três locais monitorados.

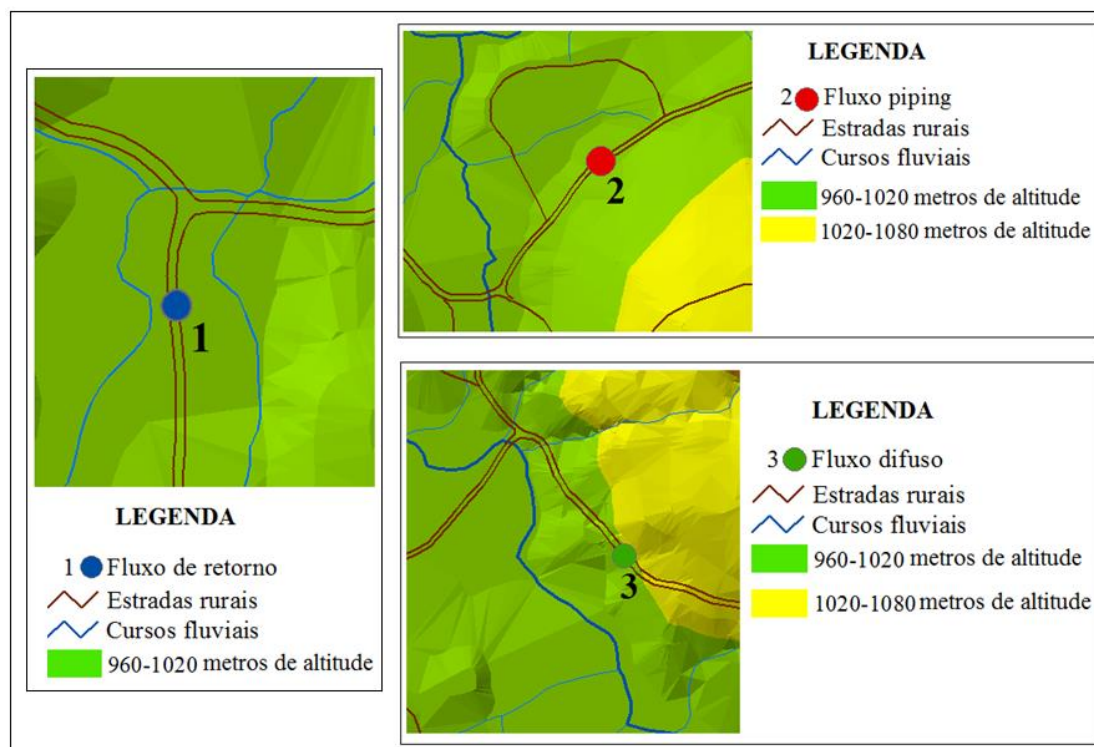


Figura 28- Recorte espacial das três formas de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas na bacia do Rio Guabiroba. Organizado pela autora (2016).

5.4.1 Características dos pontos monitorados

5.4.1.1 Ponto 1- Fluxo Subsuperficial de Retorno

Setor de vertente: a localização desse ponto monitorado é de setor fundo de vale, margeando dois canais fluviais de 2ª ordem. A textura do solo no local é argilosa e a permeabilidade do solo (20 – 40 cm) é moderada e, a partir dessa profundidade, ocorre variação no nível do fluxo subsuperficial dificultando a transmissão de água no perfil. Este local é importante na geração de Fluxo de Retorno, sendo comum também a presença de depressões úmidas que dão origem às nascentes. A forma do terreno no ponto monitorado é convergente-côncava e foi clara em representar a maneira como os talwegues condicionaram o fluxo subsuperficial em direção às áreas mais baixas desse local, facilitando o acúmulo e a permanência da água nesse setor. No interior dos horizontes do solo, nessa unidade, identificou-se a existência de um solo mais escuro na cor cinza escura sendo Gleissolo (Tabela 5).

Tabela 5- Características físicas das amostras de solo no ponto 1- Fluxo de Retorno

Coletas	Declividade	Prof (cm)	Teor de Argila (%)	Teor de Silte (%)	Teor de Areia (%)	Matiz, Valor e Cromo	Cor da Tabela de Munsell	Classificação
Ponto 1- Fluxo de Retorno	< 6%	20-40	44	26	30	10YR3 /2	Cinza escuro	Gleissolo
Ponto 1- Fluxo de Retorno	< 6%	40-60	45	27	28	10YR3 /2	Cinza escuro	Gleissolo

Dados coletados e trabalhados pela autora (2016).

No local, a proximidade do Rio Guabiroba e outros canais de 2ª e 3ª ordem favoreceu a umidade do solo, potencializando, assim, o tempo de permanência do processo de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas. A água percolada encontra dificuldade para infiltrar no solo à medida que aumenta a profundidade, permitindo a formação de uma camada de saturação, em pouca profundidade (3 a 15 cm de espessura), próxima aos canais fluviais e nos vales com baixa declividade. Já nas áreas mais planas com a combinação de chuvas mais intensas, o fluxo de saturação apareceu devido à expansão dessa camada (Figura 29).



Figura 29- Área saturada ocasionada com a interceptação do fluxo subsuperficial no ponto 1- Fluxo de Retorno.
Fotos da autora (2016).

Durante a observação, evidencia-se que essa área é mantida pelas chuvas incidentes e pelo fluxo subsuperficial das áreas a montante. Nesse ponto monitorado (1- Fluxo de Retorno), a baixa declividade (0%-6%) associada à falta de um sistema de drenagem adequado e a proximidade com dois canais fluviais, favoreceu o tempo de permanência do fluxo interceptado no leito da estrada. Como resultado ocorre pista escorregadia e atoleiros, mesmo em períodos longos (10 a 15 dias) após a precipitação. Devido à saturação do solo e a maior entrada de água disponível para o escoamento no leito das estradas existe a ocorrência de pequenos fluxos de terra, que contribuem para o assoreamento dos rios.

Nesse local, o fluxo subsuperficial percorre aproximadamente 700 m do divisor topográfico até ser interceptado pelos cortes da estrada, com amplitude altimétrica de 100 m. A partir de uma distância de 300 m do ponto monitorado, se observa que a altitude começa a ser mais expressiva sendo de forma gradual de 20 em 20 m até o divisor topográfico.

Na lateral esquerda da estrada não pavimentada, verificou-se um canal efêmero formando uma pequena bacia de drenagem que recebe contribuição de fluxo subsuperficial proveniente do topo. Dessa forma, devido ao fluxo de montante e ao gradiente hidráulico existente ao longo do canal (degraus) resultou em contribuição com a vazão do canal de 2ª ordem (Figura 30).



Figura 30- Ponto 1-Fluxo de Retorno: interceptação do fluxo subsuperficial por cortes da estrada. Camada saturada a pouca profundidade provocando a desestabilização do talude e contribuição com a vazão do canal de 2ª ordem.
Foto da autora (2016).

5.4.1.2 Ponto 2- Fluxo Subsuperficial *Piping*

Setor de vertente: o setor predominante nesse ponto é de média vertente. Essa unidade está localizada próximo a um canal de 3ª ordem e é comum a presença de dutos (*pipings*) em atividade. A permeabilidade do solo é baixa, entretanto quando a água encontra macroporos (dutos) escoar em velocidade, sendo eficiente no sistema de drenagem com a transmissão de água para os canais receptores. A forma do terreno nesse setor é divergente-retilíneo, apresentando a dispersão do fluxo subsuperficial, dificultando, assim, o aparecimento de canais de drenagem no local, caracterizando, portanto, o predomínio de locais com infiltração de água no solo. O solo no local é caracterizado por apresentar cor castanha (Tabela 6).

Tabela 6- Características físicas das amostras de solo no ponto 2- Fluxo *Piping*

Coletas	Declividade	Prof (cm)	Teor de Argila (%)	Teor de Silte (%)	Teor de Areia (%)	Matiz, Valor e Cromo	Cor da Tabela de Munsell	Classificação
Ponto 2- Fluxo <i>Piping</i>	12-20%	20-40	55	18	27	5YR4/4	Castanho	Latossolo
Ponto 2- Fluxo <i>Piping</i>	12-20%	40-60	62	19	18	5YR4/6	Castanho escuro	Latossolo

Dados coletados e trabalhados pela autora (2016).

Foram observados ao todo cinco *pipings* na BRG e desses, o diâmetro entre um e outro varia muito, tendo poucos centímetros (média de $4 \pm 4,2$ cm $n=2$) em alguns pontos e em outros podendo atingir mais de 50 cm (média de $18,8 \pm 16,7$ cm $n=3$), de acordo com os encontrados na bacia da área de estudo (Figura 31). Distingue-se, também, *pipings* perenes daqueles intermitentes e efêmeros. Dependendo do local que estão localizados, podem ter fluxos constantes (*pipings* perenes), fluxos que se restringem aos períodos de chuva (*pipings* intermitentes) ou fluxos apenas durante ou logo após as chuvas (*pipings* efêmeros).



Figura 31- *Pipings* encontrados na bacia do Rio Guabiroba. Em A, *piping* com 7 cm de diâmetro, em B *piping* com 50 cm de diâmetro e em C *piping* com 3 cm de diâmetro. Fotos da autora (2015).

Na BRG, os tipos de fluxo na forma de *piping* são basicamente perenes e efêmeros. Os *pipings* efêmeros se distribuem em diversos gradientes topográficos da BRG. Entretanto, o fluxo monitorado foi o ponto 2- Fluxo *Piping* (Figura 29) na forma perene, mede 50 cm de diâmetro e, aproximadamente, 250 m de comprimento, localizado próximo a um canal de 3ª ordem. Esse ponto 2- Fluxo *Piping* ou duto apresenta um colapso no teto a cinco metros vertente a montante do local em que o mesmo foi interceptado pela estrada.

Esse ponto monitorado se situa entre dois canais fluviais, interrompido por cortes da estrada que capta a água do fluxo subsuperficial redirecionando-a para o canal receptor na margem esquerda do Rio Guabiroba. Nessa situação, as conexões hidrológicas existentes dentro do solo resultaram na transmissão de água entre áreas separadas (topo da vertente) e as redes fluviais (fundo de vale). Depois de interceptado pelos cortes da estrada, a água do fluxo subsuperficial escoar em velocidade, devido à pouca resistência (ausência de dissipadores de energia) e pela declividade acentuada (20%), fazendo com que o fluxo subsuperficial tenha maior volume e competência sendo então conectado ao canal fluvial (Figura 32).



Figura 32- Fluxo subsuperficial no ponto 2-*Piping*.
Foto da autora (2015).

Já interceptado pela estrada, por consequência, o fluxo subsuperficial percorre aproximadamente 250 m formando um canal intermitente no sentido longitudinal da estrada que o intercepta até atingir o canal de 3ª ordem, localizado na margem esquerda do Rio Guabiroba. Isso ocasionou o aumento de água disponível vertente abaixo. A água interceptada potencialmente contribui para o alargamento do canal receptor (Figura 33).



Figura 33- Conexão do Fluxo no Ponto 2- *Piping* com o canal fluvial de 3ª ordem. Foto da autora (2015).

Esse fluxo subsuperficial interceptado pela estrada percorre aproximadamente 500 m do divisor topográfico. Portanto, na jusante da interceptação do fluxo subsuperficial ocorreu o aumento da água no sentido longitudinal da estrada e, devido também ao aumento da pressão hidrostática, o fluxo subsuperficial rompeu à superfície e novamente a água volta a escoar sobre a mesma.

5.4.1.3 Ponto 3- Fluxo Subsuperficial Difuso

Setor de vertente: neste ponto monitorado prevalece o setor de alta vertente. Este setor apresenta uma transição abrupta no setor superior (patamar) com o setor inferior (fundo de vale). Está localizado próximo a 6 canais fluviais de 1ª ordem, em que cortes da estrada no sentido longitudinal do talude potencializou o processo de interceptação do fluxo subsuperficial. O solo dessa unidade é profundo, e mede aproximadamente 2,5

m de profundidade nos cortes da estrada. A cor predominante do solo é castanho avermelhado, ocorrendo com frequência afloramento de rocha no local (Tabela 7). A forma de terreno nesse setor é divergente-côncavo, que associado à presença de fragmentos de rocha resultou na dissipação da água no local, principalmente, no sentido longitudinal do talude da estrada não pavimentada.

Tabela 7- Características físicas das amostras de solo no ponto 3- Fluxo Difuso

Coletas	Declividade	Prof (cm)	Teor de Argila (%)	Teor de Silte (%)	Teor de Areia (%)	Matiz, Valor e Croma	Cor da Tabela de Munsell	Classificação
Ponto 3- Fluxo Difuso	> 30%	20-40	47	29	24	2.5YR4/4	Castanho avermelhado	Latossolo
Ponto 3- Fluxo Difuso	> 30%	40-60	50	25	25	2.5YR3/3	Castanho avermelhado	Latossolo

Dados coletados e trabalhados pela autora (2016).

O principal efeito observado nesse ponto monitorado (ponto 3- Fluxo Difuso) foi que a água tende a se expandir lateralmente no talude quando é aliviada (exfiltrada) por cortes profundo da estrada. Nessa situação, a água é exfiltrada paralela ao talude e na estrada que a intercepta, já o fluxo subsuperficial interceptado e depois concentrado, percorre em torno de 320 m no sentido longitudinal da estrada até o canal receptor mais próximo e 500 m do divisor topográfico até os cortes da estrada que o intercepta. No local monitorado, foi notado que a presença de rochas é uma característica comum, além do mais a pedregosidade superficial e subsuperficial presente contribuiu com a interceptação do fluxo subsuperficial.

Ressalta-se, ainda, que a dinâmica do processo se intensifica com a dissipação da água da vertente divergente-convexa que é direcionada e depois captada pelas vertentes divergente-côncavas até a interceptação da estrada. Essa característica do local pode tornar o processo do escoamento do fluxo subsuperficial com pressão hidrostática, pressionando o fluxo subsuperficial que é aliviado (exfiltrado) por cortes da estrada alguns metros na parte mais baixa da vertente (Figura 34).



Figura 34- Fluxo 3-Difuso. Em A, redirecionamento do fluxo interceptado pela estrada para um canal fluvial, em B dissipação da água na vertente divergente convexa. Fotos da autora (2015).

Dessa forma, foi possível caracterizar os aspectos geomorfológicos, hidrológicos e pedológicos de cada um dos três locais monitorados. A partir dessa caracterização hidrogeomorfológica buscou-se, também, entender qualitativamente as inter-relações atuais entre: formas, materiais e processos em cada um dos locais monitorados, que resulta primeiramente numa interceptação do fluxo subsuperficial pelos cortes da estrada não pavimentada e, posteriormente, numa transmissão e redirecionamento desse fluxo interceptado para o canal fluvial (conexão vertente com o rio).

5.5 PRECIPITAÇÃO, VAZÃO MÁXIMA E NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO MONITORADOS

5.5.1 Precipitação

Por meio de monitoramento, foram registrados no total 79 eventos de chuva entre maio de 2014 a agosto de 2015 (total de 1 ano e 3 meses de monitoramento). Dos dados registrados, o mês que apresentou maior volume pluviométrico foi o mês de junho/2014 com um total médio de $458,2 \pm 27,6$ mm, $n=3$, seguido pelo mês de julho/2015 com um total de $312,5 \pm 16,9$ mm $n=3$. Os dois meses menos significativos em pluviosidade foram outubro/2014 com $25,7 \pm 10,1$ mm, $n=3$ e novembro/2014 com $38,9 \pm 6,0$ mm, $n=3$ de todos os eventos registrados (Figura 35).

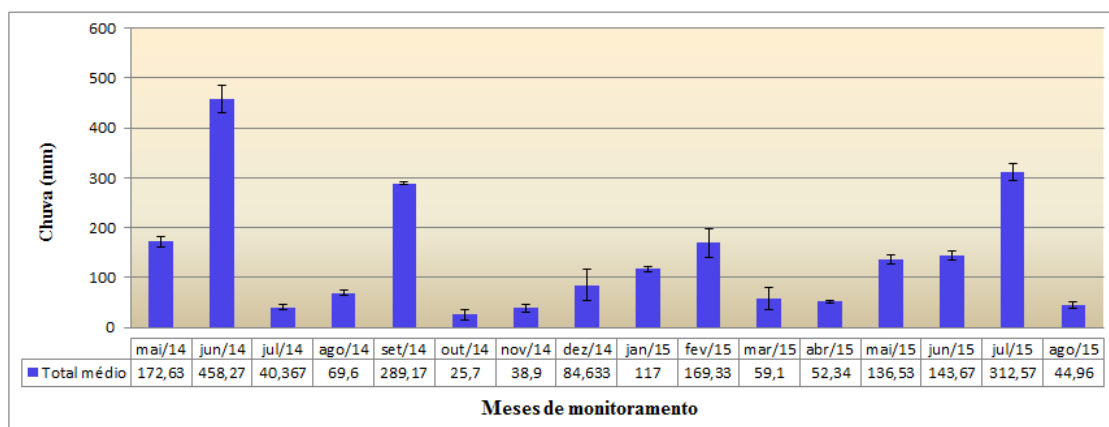


Figura 35- Total médio mensal de chuva registrada nos três pluviógrafos com os respectivos desvio padrão de cada mês monitorado. Organizado pela autora (2015).

A média da soma total de pluviosidade registrada nos três pluviógrafos foi de 2.340,4 mm, no período monitorado. Porém, no mês de junho/2014 houve 3 eventos pluviométricos excepcionais quando comparados aos outros meses, alterando a média pluviométrica mensal que foi 138,4 mm, no período monitorado, sendo os seguintes eventos: (06/06/14 com 84,4 mm, 07/06/14 com total de 250,2 mm e 08/06/14 com 72,8 mm) representando, assim, 20,6% do volume de chuva do período analisado. Ressalta-se que este foi um ano de El Niño aumentando assim os índices pluviométricos registrados.

Os totais de chuva foram divididos em classes de 10 mm para verificar a frequência de eventos. Na Tabela 8, observa-se que a classe de chuva de 10-19,9 mm registrou 21 eventos (26,5%), no entanto essa classe acumulou apenas 298,9 mm do total registrado. Por outro lado, a classe com evento igual ou superior a 50 mm teve um total de 13 eventos registrados (16,4%), contudo acumulou 891,2 mm, respondendo, assim, por 38% da precipitação total do período.

Tabela 8– Distribuição da precipitação por classe, total acumulado em mm e participação no total da precipitação no período de 21/05/2014 a 31/08/2015.

Classe de chuva (mm)	Número de eventos	Intensidade média (mm/h)	Total de precipitação acumulada (mm)	Frequência (%)	Precipitação acumulada (%)
1-9,9	10	1,6	71,9	12,6	3,0
10-19,9	21	4,5	298,9	26,5	12,7
20-29,9	17	6,1	375,1	21,5	16,3
30-39,9	6	6,8	208,8	7,8	8,9
40-49,9	12	5,9	494,5	15,2	21,1
≥ 50	13	11,1	891,2	16,4	38,0
Total	79	6,1	2.340,4	100,0	100

Dados coletados e trabalhados pela autora (2014/2015).

Portanto, os eventos iguais ou superiores a 30 mm representam a menor quantidade registrada (31 eventos), entretanto em volume pluviométrico somado são os eventos que mais contribuem com precipitação somando 1.594,5 mm (68,2%), ao passo que os eventos inferiores a 30 mm, foram 48 eventos no total, somando 745,9 mm (31,8%) do total registrado.

A intensidade da chuva foi medida levando-se como parâmetro o tempo de 1 hora. A intensidade média desses eventos (79), em relação a pluviosidade total, foi de 6,1 mm/h, variando entre 1,6 mm/h a 11,1 mm/h. Constatou-se que o pico da precipitação, isto é, o período em que o volume de chuva foi maior, durou em torno de 00h50min a 7h30min. Nesse intervalo, ocorreu em média 78% do volume total de chuva dos eventos.

Além da participação, em termos absolutos, os eventos possuem características físicas importantes como intensidade, frequência e duração (Figuras em apêndice). Observa-se que do total de registros, a maioria dos eventos estão entre fraco e moderado, contudo os eventos fortes e muito forte apesar de poucos somam 667,6 mm (Tabela 9).

Tabela 9- Distribuição dos eventos de chuva por intensidade no período de 21/05/2014 a 31/08/2015

Eventos	Total registrado	Total acumulado (mm)	Total (%)
Fraco	40	724,3	50,6
Moderado	34	948,4	43,1
Forte	4	431,7	5,1
Muito forte	1	235,9	1,2
TOTAL	79	2.340,4	100

Fonte: Minuzzi e Sediyaama (2004).

Dados coletados e trabalhados pela autora (2016).

5.5.2 Variação da profundidade do nível do lençol freático nos locais monitorados

Em cinco meses de monitoramento (abril a agosto/2015) foram ao todo 19 eventos (profundidade do nível do lençol freático em cm), nos três locais de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes da estrada (ponto 1- Fluxo de Retorno, ponto 2- Fluxo *Piping* e ponto 3- Fluxo Difuso). Na sequência, tem-se o exemplo do monitoramento da profundidade do nível do lençol freático por meio de piezômetro no ponto 1- Fluxo de Retorno (Figura 36).



Figura 36- Monitoramento da profundidade do nível do lençol freático a partir da superfície do solo por meio de piezômetro no ponto 1- Fluxo de Retorno.
Foto da autora (2015).

Ressalta-se que as medições foram realizadas em média 1 hora após o término da chuva. Por meio do monitoramento da profundidade do nível do lençol freático foi possível observar que este respondeu as variações em função da precipitação, ou seja, os dados analisados apresentam variação do nível do lençol freático em um pequeno intervalo de tempo. Nos meses de maio, junho e julho/2015 foram registrados os maiores volumes de chuva e, assim, as maiores elevações da profundidade do nível do lençol freático, com mais de 87% das maiores elevações do nível do lençol freático em toda a série analisada, enquanto que nos meses de abril e agosto respondem por pouco mais de 12% da série (Figura 37).

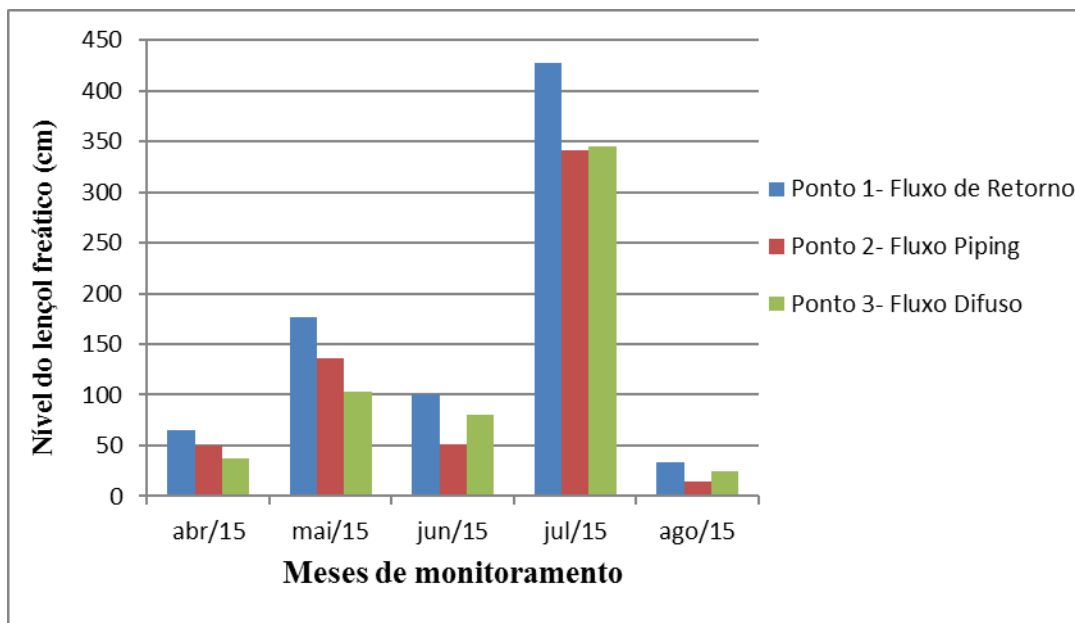


Figura 37- Profundidade do nível do lençol freático em cinco meses de monitoramento nos três locais de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas. Organizado pela autora (2016).

Em relação aos três pontos monitorados, a profundidade do nível do lençol freático no ponto 1- Fluxo de Retorno foi o que mais subiu, respondendo, assim, de forma positiva em relação à variação da precipitação ocorrida no período avaliado, quando comparado com os outros dois locais monitorados. Ao todo, o ponto 1- Fluxo de Retorno representou 45,5% cm de altura do nível do lençol freático da série monitorada ao passo que o ponto 3- Fluxo Difuso, representou 30,3% e o ponto 2- Fluxo *Piping*, representou 24,2 cm de altura do nível do lençol freático no período monitorado (Figuras 38, 39, 40, 41 e 42).

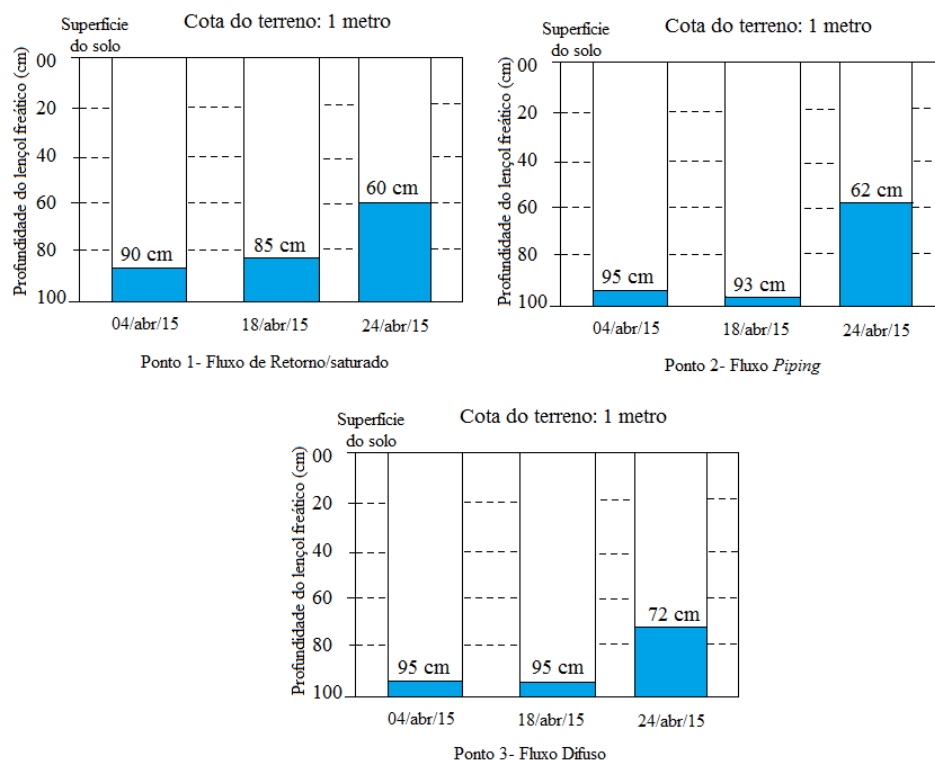


Figura 38– Profundidade do lençol freático avaliado nos dias 04, 18 e 24 de abril/2015, e respectiva cota do terreno.

Nota: a parte destacada em azul na figura representa a profundidade do lençol freático. Elaborada pela autora (2016).

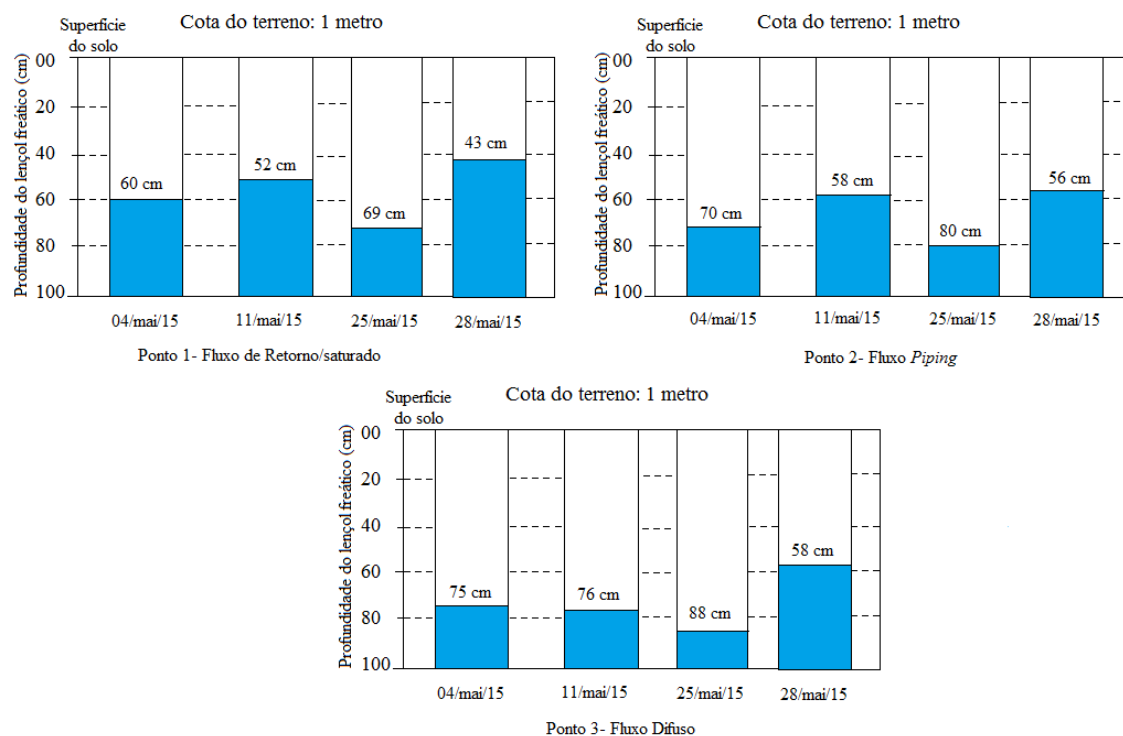


Figura 39– Profundidade do lençol freático avaliado nos dias 04, 11, 25 e 25 de maio/2015, e respectiva cota do terreno.

Nota: a parte destacada em azul na figura representa a profundidade do lençol freático. Elaborada pela autora (2016).

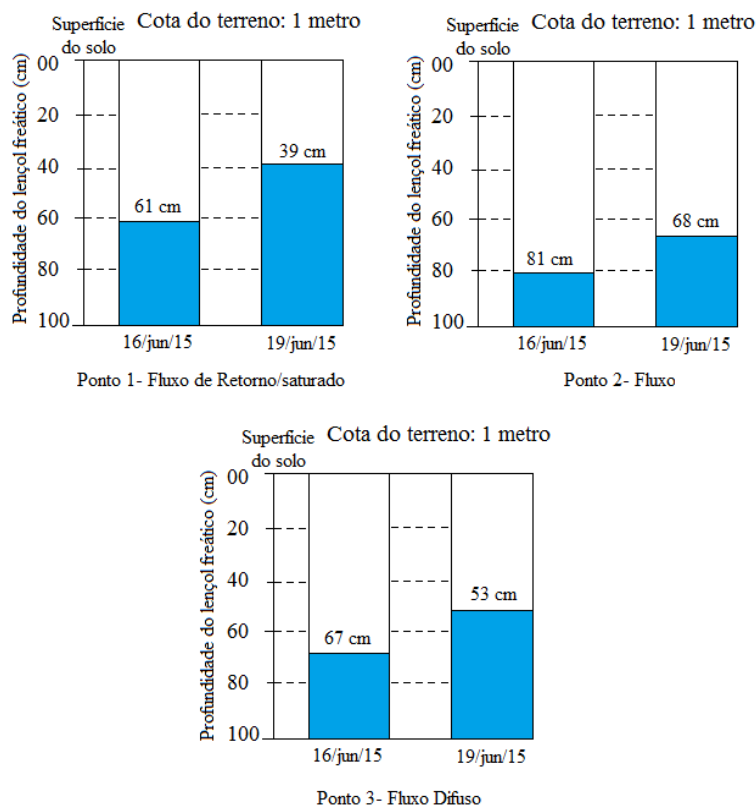


Figura 40– Profundidade do lençol freático avaliado nos dias 16 e 19 de junho/2015, e respectiva cota do terreno.

Nota: a parte destacada em azul na figura representa a profundidade do lençol freático.

Elaborada pela autora (2016).

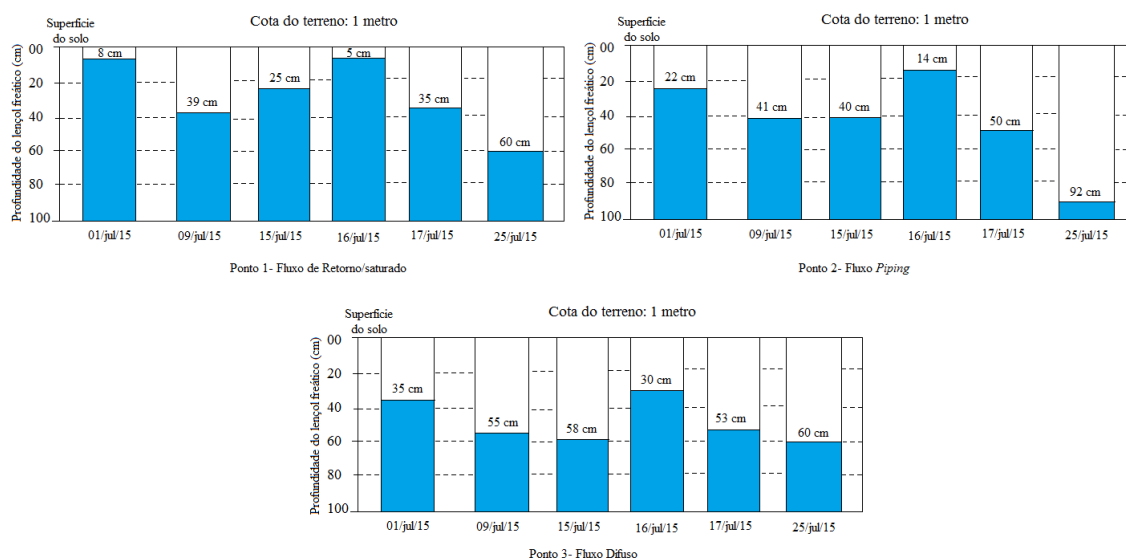


Figura 41– Profundidade do lençol freático avaliado nos dias 01, 09, 15, 16, 17 e 25 de julho/2015, e respectiva cota do terreno.

Nota: a parte destacada em azul na figura representa a profundidade do lençol freático.

Elaborada pela autora (2016).

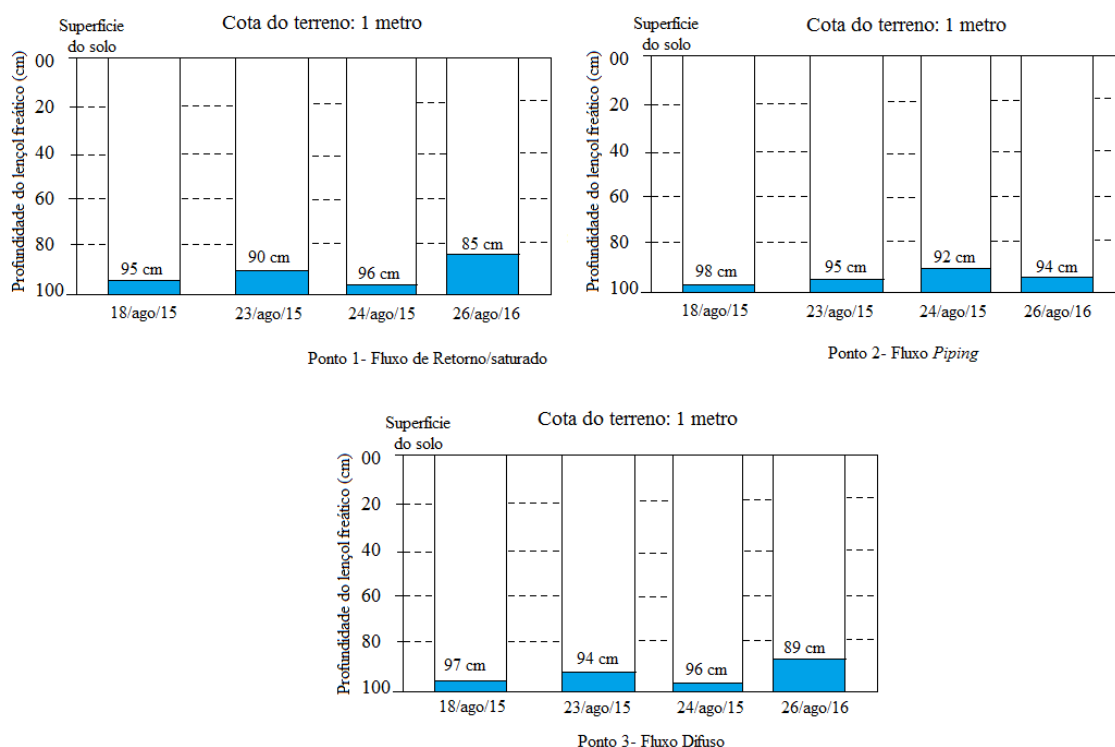


Figura 42– Profundidade do lençol freático avaliado nos dias 18, 23, 24 e 26 de agosto/2015, e respectiva cota do terreno.

Nota: a parte destacada em azul na figura representa a profundidade do lençol freático.

Elaborada pela autora (2016).

Pelas observações, pode-se inferir que houve alteração entre o maior e o menor pico do nível do lençol freático (elevação e rebaixamento) nos três locais monitorados. Entretanto, os três pontos monitorados responderam de forma semelhante em relação à precipitação com elevação (período chuvoso) e rebaixamento (período seco) do nível do lençol freático (Tabela 10).

Tabela 10- Alteração da profundidade do nível do lençol freático nos três pontos monitorados

Nível lençol freático	Dia/mês/ 2015	Ponto 1- Fluxo de Retorno	Ponto 2- Fluxo Piping	Ponto 3- Fluxo Difuso
Média (cm)	—	42,2±27	31,2±25	29,6±21
Maior Elevação (cm)	16/jul	95	96	70
Maior Rebaixamento (cm)	24/ago	04	02	04

Dados coletados e trabalhados pela autora (2016).

Existe, portanto, semelhança em relação a profundidade do nível do lençol freático nos três pontos de monitoramento (ponto 1- Fluxo de Retorno, ponto 2- Fluxo Piping e ponto 3- Fluxo Difuso). Em ambos os casos a profundidade do nível do lençol

freático aumentou no mês de julho/15 (mês mais chuvoso) e abaixou no mês de agosto/2015 (mês menos chuvoso) (Figura 43).

Entretanto, como já mencionado, a profundidade do nível do lençol freático no ponto 1- Fluxo de Retorno teve uma contribuição maior em relação aos outros dois pontos monitorados. Essa contribuição pode estar relacionada, principalmente, ao fato de se tratar de uma área saturada em que a água tem maior dificuldade para ser drenada para as partes mais profundas do solo, favorecendo, assim, o tempo de permanência de atividade da interceptação do fluxo subsuperficial causado pela estrada.

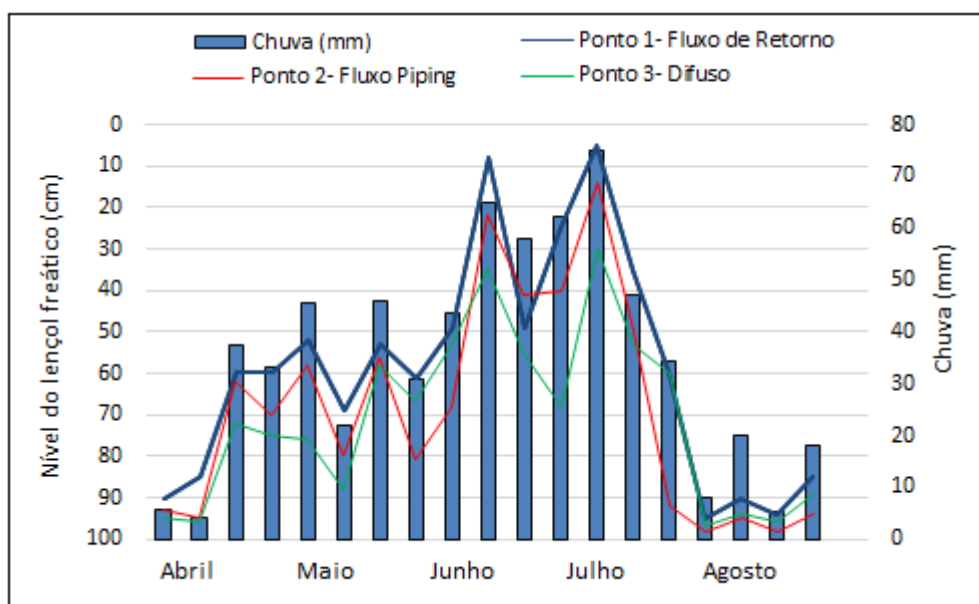


Figura 43- Resposta da profundidade do nível do lençol freático em relação a precipitação nos três pontos monitorados.

Organizado pela autora (2016).

Com teste não paramétrico *Mann-Whitney* (0,05%) comparou-se a mediana das variáveis hidrológicas da profundidade do nível do lençol freático entre o ponto 1- Fluxo de Retorno e os outros dois locais monitorados. Pelo valor calculado, o teste não paramétrico *Mann-Whitney* fez-se a comparação desses dois grupos não pareados testando a igualdade das medianas, os valores de U calculado pelo teste avaliaram o grau de semelhança e diferenças dos dados dos dois grupos após a ordenação (Tabela 11).

Tabela 11- Teste *Mann-Whitney* (0,05%) nos três pontos monitorados

Pontos Monitorados	Valor (p) Mediana n= 5 meses	Valor de (U) (0,00) n= 19 amostras	Profundidade do nível do lençol freático (cm) Máxima média
1- Fluxo de Retorno X 2- Fluxo Piping	0,09	135	36 a
1- Fluxo de Retorno X 3- Fluxo Difuso	0,09	134	35 a
2- Fluxo Piping X 3- Fluxo Difuso	0,60	185	30 b

Dados coletados e trabalhados pela autora (2015).

Foi verificado que há uma separação dos dados em conjunto, indicando que as amostras são distintas, rejeitando-se a hipótese de igualdade das medianas entre o ponto 1- Fluxo de Retorno e os outros dois pontos monitorados. Isso decorre, pois quanto mais baixo é o valor de U (0.00), é maior a diferença das amostras. O valor de p (0.09) é menor que 5%, concluindo que existe uma diferença significativa entre a mediana das amostras. Isso reforça a ideia que nos pontos 2- Fluxo *Piping* e 3- Fluxo Difuso a drenagem é maior do que no ponto 1- Fluxo de Retorno.

Nos três pontos monitorados existiu variabilidade entre o valor mínimo e máximo em relação ao nível do lençol freático. Contudo, no ponto 1- Fluxo de Retorno com contribuição maior em relação ao nível do lençol freático, como era esperado, apresentou uma amplitude maior quando comparado aos outros dois locais monitorados, indicando versatilidade dentro do mesmo ambiente em resposta a precipitação (Figura 44).

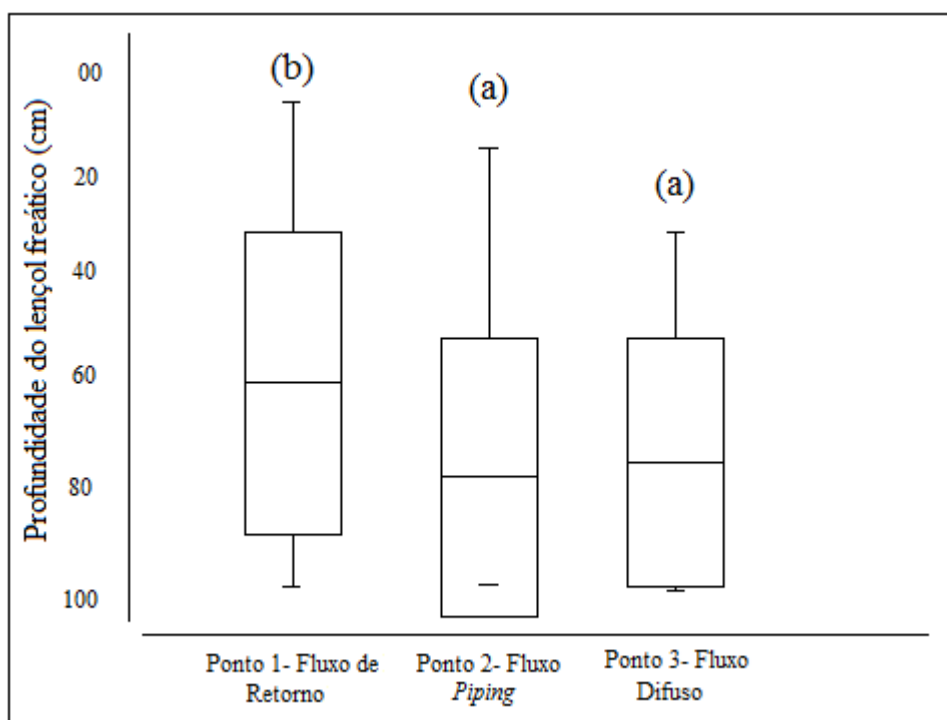


Figura 44- Média e valor mínimo e máximo da profundidade do nível do lençol freático nos três pontos de monitoramento. Organizado pela autora (2015).

5.5.3 Monitoramento da vazão máxima em locais de interceptação de fluxo subsuperficial causado por cortes de estradas não pavimentadas

Por meio de monitoramento da vazão máxima com as quatro calhas instaladas, foi registrado um total de 60 eventos de vazão máxima (L/s), em 12 meses de monitoramento (setembro/2014 a agosto/2015). O total médio de vazão máxima no período monitorado foi maior no rio de 2ª ordem com $100,8 \pm 52,7$ L/s (Tabela 12). Com isso, ressalta-se que esse canal fluvial recebe a contribuição da vazão máxima monitorada no ponto 1- Fluxo de Retorno.

Tabela 12- Contribuição média de vazão máxima em cada ponto monitorado

Vazão	Ano/mês	Rio 2ª ordem	Ponto 1- Fluxo de Retorno	Ponto 2- Fluxo Piping	Ponto 3- Fluxo Difuso
Total médio (L/s)	set/14 à ago/15	$100,8 \pm 52,7$	$8 \pm 1,7$	$26,3 \pm 17,4$	$8,6 \pm 2,8$
Máxima (L/s)	Jul/14	229	10,2	73,4	13,1
Mínima (L/s)	Ago/15	45	4,6	3,2	4,4

Dados coletados e trabalhados pela autora (2016).

A diferença em relação à vazão máxima nos três locais monitorados foi maior no ponto 2- Fluxo *Piping*, com contribuição total de 61,4% da série analisada (comparação dos três pontos monitorados). O ponto 1- Fluxo de Retorno e o ponto 3-Fluxo Difuso somam 38,6% do volume de vazão máxima interceptada pela estrada, sendo 18,6% no ponto 1- Fluxo de Retorno e 20% no ponto 2- Fluxo *Piping* (Figuras 45, 46, 47, e 48).

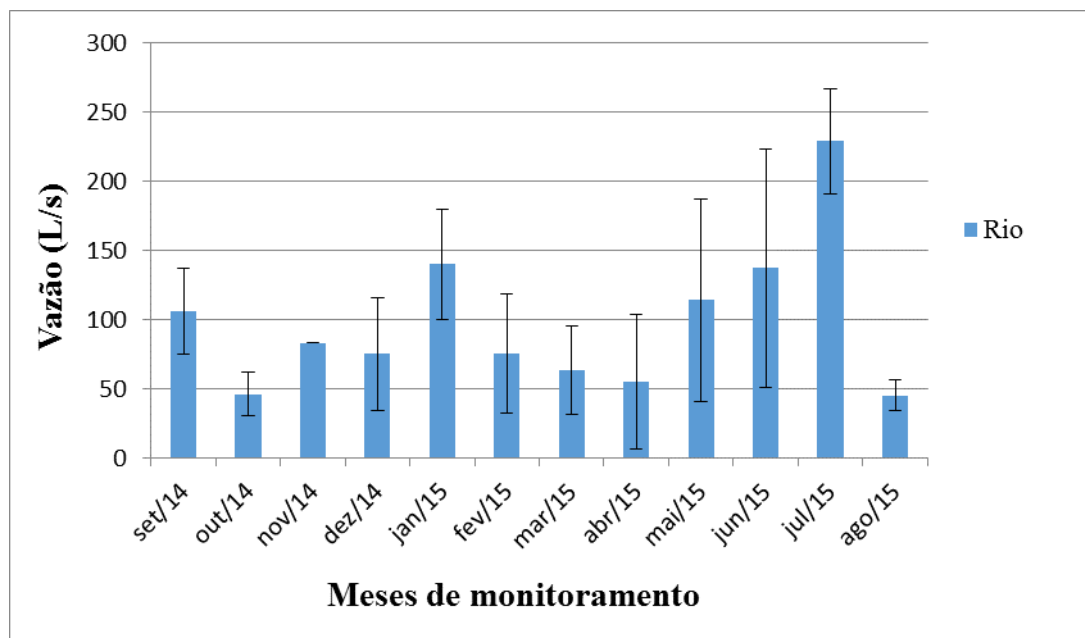


Figura 45- Vazão máxima (L/s) registrada nos 12 meses de monitoramento no canal de 2ª ordem na bacia do Rio Guabiroba com o desvio padrão de cada mês. Organizado pela autora (2016).

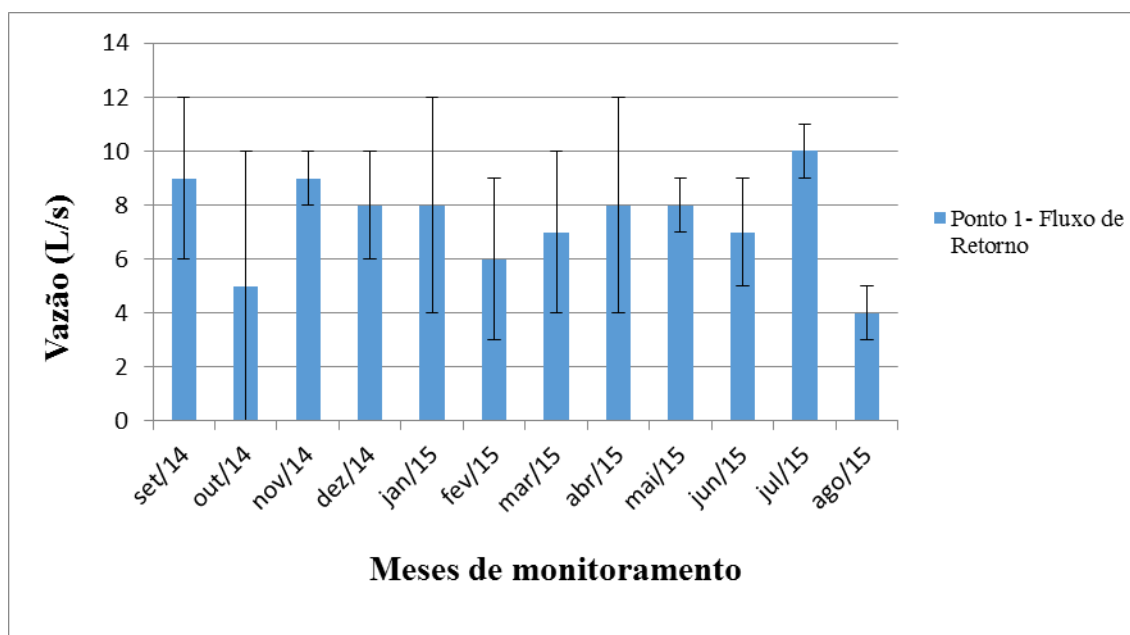


Figura 46- Vazão máxima (L/s) registrada nos 12 meses de monitoramento no ponto 1- Fluxo de Retorno na bacia do Rio Guabiroba com o desvio padrão de cada mês. Organizado pela autora (2016).

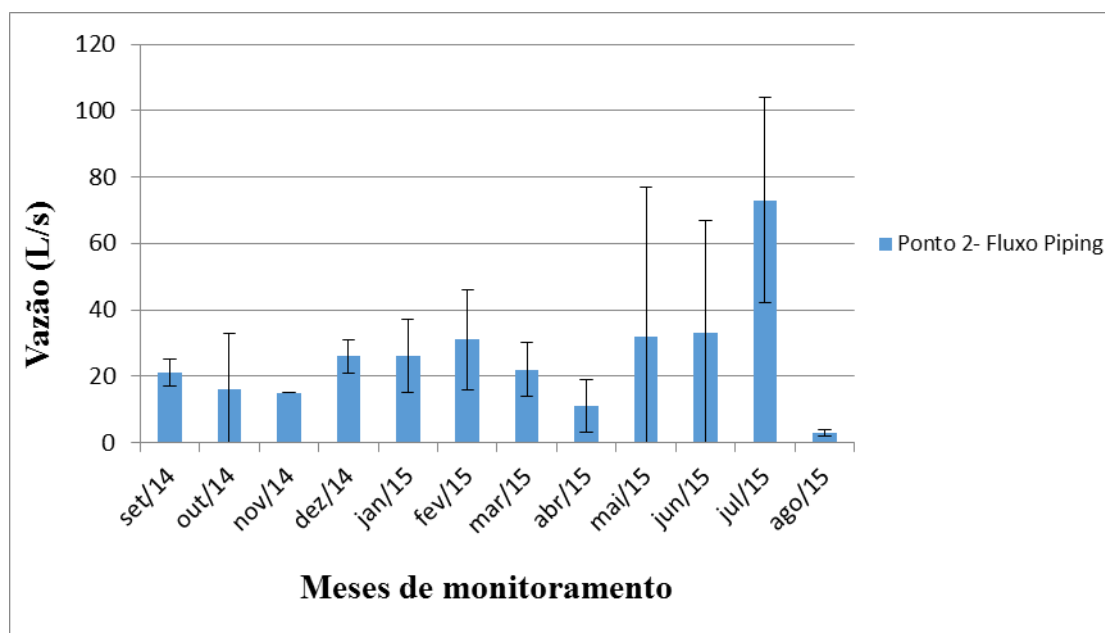


Figura 47- Vazão máxima (L/s) registrada nos 12 meses de monitoramento no ponto 2- Fluxo Piping na bacia do Rio Guabiroba com o desvio padrão de cada mês. Organizado pela autora (2016).

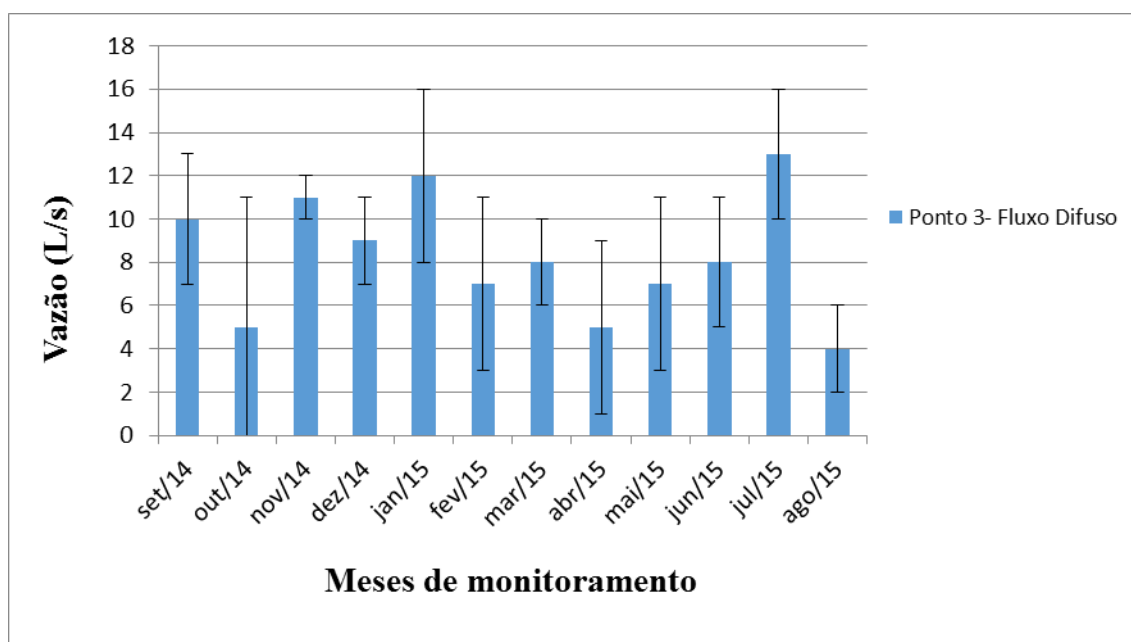


Figura 48- Vazão máxima (L/s) registrada nos 12 meses de monitoramento no ponto 3- Fluxo Difuso na bacia do Rio Guabiroba com o desvio padrão de cada mês. Organizado pela autora (2016).

Nos três pontos de interceptação do fluxo subsuperficial monitorados, o maior pico de vazão correspondeu a julho/2015, enquanto o menor pico de vazão correspondeu a agosto/2015. Nessa perspectiva, fica evidente que o ponto 2- Fluxo Piping é o que mais contribui em termos de maior pico de vazão registrada com uma

soma total de $1.563 \pm 131,9$ L/s. O ponto 3- Fluxo Difuso teve soma de maior pico de vazão com $511,1 \pm 23,6$ L/s e o ponto 1- Fluxo de Retorno teve soma de maior pico de vazão registrada com $463,8 \pm 16,9$ L/s em todo o período de monitoramento (1 ano) (Figura 49).

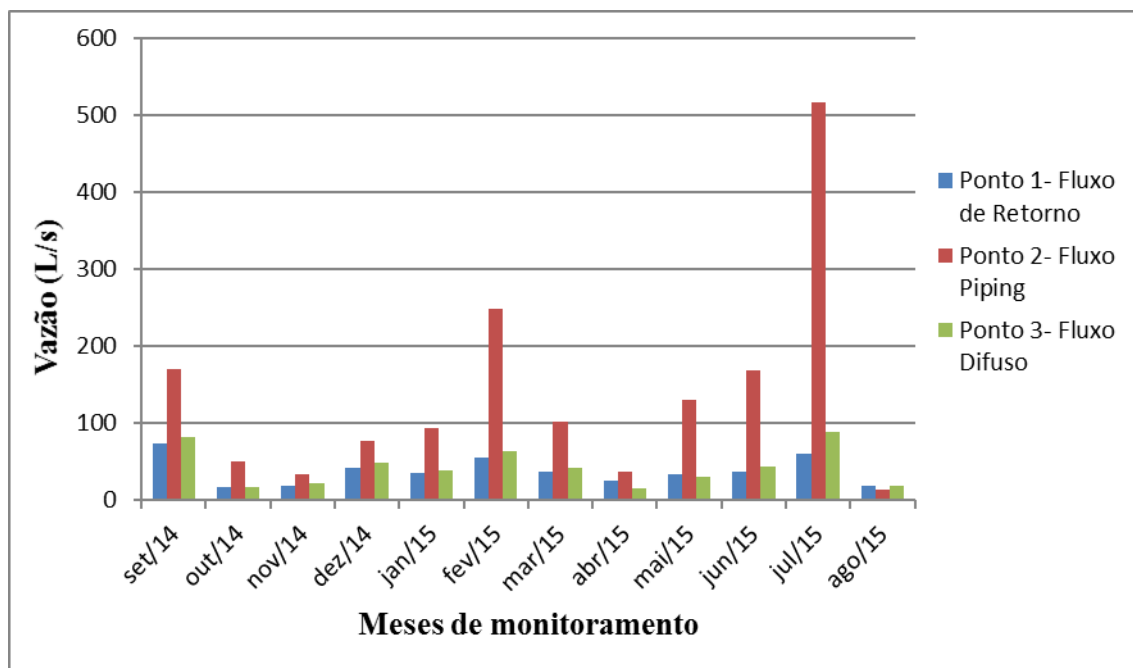


Figura 49- Soma de maior pico de vazão (L/s) nos três pontos de monitoramento no período de um ano (setembro/2014 a agosto/2015). Organizado pela autora (2015).

Existe semelhança na vazão máxima interceptada no ponto 1- Fluxo de Retorno e o ponto 3- Fluxo Difuso com diferença somente de 1,3% entre esses dois pontos. Essa semelhança entre esses dois pontos se estende em relação à estabilidade na vazão máxima registrada, oscilando entre 4 e 12 L/s em todo o período monitorado, ao passo que no ponto 2- Fluxo *Piping* essa variação foi maior estando entre 3 e 73 L/s, com diferença de variação do total médio de vazão máxima de 96% dos meses monitorados.

Por meio do teste não paramétrico *Mann-Whitney* (0,05%), comparou-se a mediana das variáveis hidrológicas de vazão máxima entre o ponto 2- Fluxo *Piping* e os outros dois locais monitorados. Pelo valor calculado, o teste não paramétrico *Mann-Whitney* fez-se a comparação desses dois grupos não pareados testando a igualdade das medianas. Os valores de U, calculados pelo teste, mostram o grau de semelhança e diferença dos dados dos dois grupos após a ordenação (Tabela 13).

Tabela 13- Teste *Mann-Whitney* (0,05%) nos três pontos monitorados

Pontos Monitorados	Valor (p) Mediana n= 12 meses	Valor de (U) (0,00) n= 60 amostras	Vazão máxima média (L/s)
1- Fluxo de Retorno X 2- Fluxo <i>Piping</i>	0,0003	12,00	20 a
1- Fluxo de Retorno X 3- Fluxo Difuso	0,22	59,00	11 b
2- Fluxo <i>Piping</i> X 3- Fluxo Difuso	0,0003	13,00	21 a

Dados coletados e trabalhados pela autora (2015).

Foi verificado que há uma separação dos dados em conjunto, indicando que as amostras são distintas, rejeitando-se a hipótese de igualdade das medianas entre o ponto 2- Fluxo *Piping* e os outros dois pontos monitorados, pois quanto mais baixo é o valor de U (0.00) maior é a diferença das amostras. O valor de p (0.0003) é menor que 5%, concluindo, assim, que existe uma diferença significativa entre a mediana das amostras.

Nos três pontos monitorados existiu variabilidade entre o valor mínimo e máximo em relação à vazão máxima registrada. Apesar disso, no ponto 2- Fluxo *Piping* a variabilidade entre o valor mínimo e máximo de vazão máxima registrada foi muito superior comparada aos outros dois pontos monitorados (amplitude $70 \pm 17,4$ L/s), indicando mecanismos variados dentro do mesmo ambiente em resposta a precipitação com chuvas mais intensas (Figura 50). Nesse caso, houve um valor atípico (*outlier*) com 73,4 L/s em um único evento alterando a média dos eventos monitorados nesse ponto.

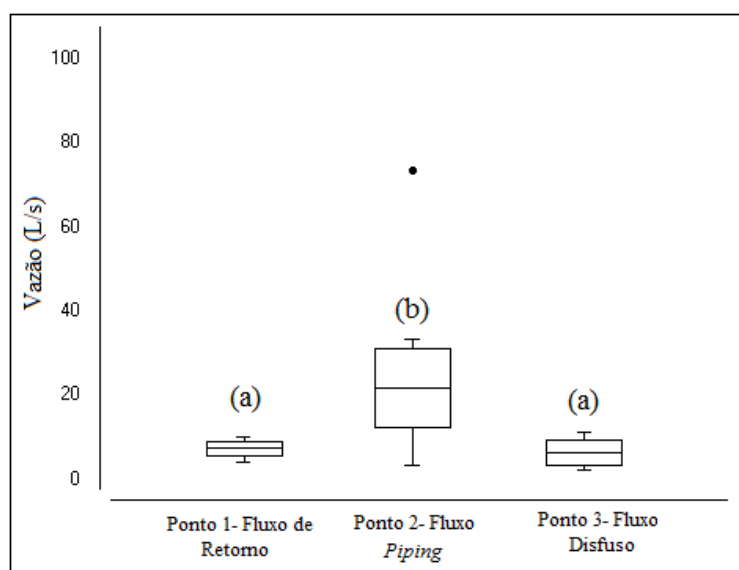


Figura 50- Média e valor mínimo e máximo de vazão máxima nos três pontos de monitoramento.
Organizado pela autora (2015).

A dinâmica do processo de interceptação da vazão máxima (tempo e espaço) no ponto 2- Fluxo *Piping* é parecida como a que ocorre no canal de 2ª ordem. Nessa situação, a vazão máxima monitorada no ponto 2- Fluxo *Piping* escoa em velocidade tornando esse local um canal de drenagem intermitente, dependendo do tempo de que permanece a interceptação do fluxo subsuperficial (Figura 51).

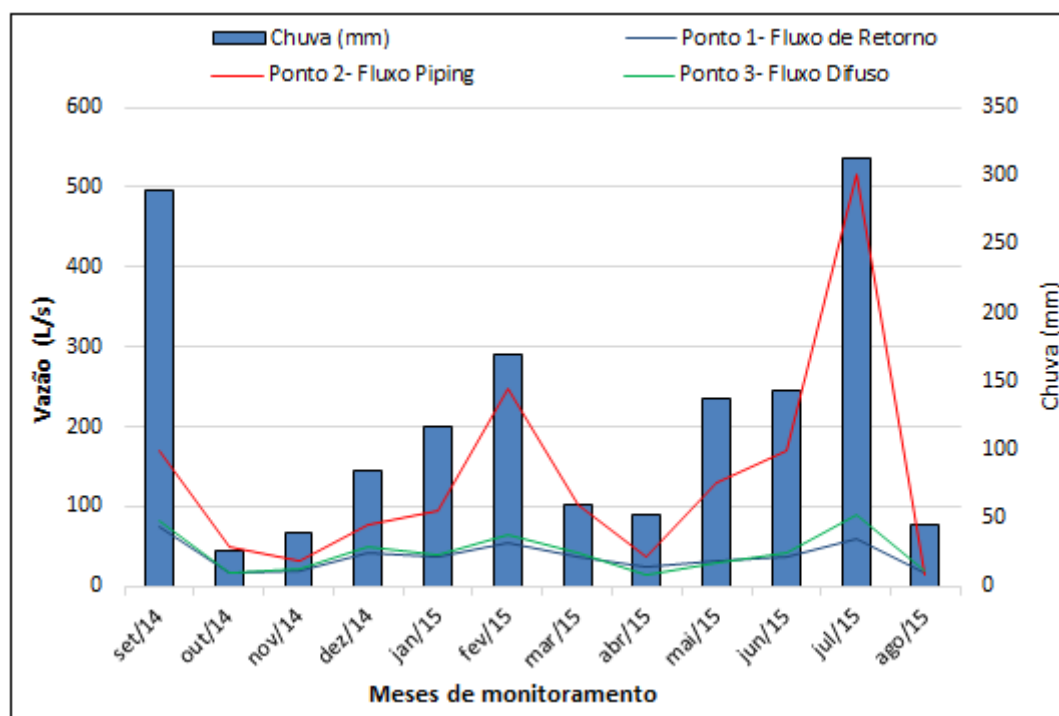


Figura 51- Resposta da vazão máxima em relação a precipitação nos três pontos monitorados.

Organizado pela autora (2015).

Esses volumes de chuva, vazão máxima e o nível do lençol freático foram fundamentais para auxiliar no entendimento dos processos desencadeadores/geradores em cada um dos fluxos monitorados. Sendo assim, foi possível observar, monitorar e analisar as propriedades (especificidades) de cada ponto monitorado, correlacionando as variáveis para compreender quais processos influenciam em quais formas.

5.6 CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO, VAZÃO MÁXIMA E A PROFUNDIDADE DO NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO NOS TRÊS PONTOS MONITORADOS

5.6.1 Correlação entre precipitação e a profundidade do nível do lençol freático nos locais monitorados

Foram monitorados 19 eventos da profundidade do nível do lençol freático nos três locais de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes da estrada, sendo um piezômetro monitorado em cada local. Os eventos monitorados compreenderam um período seco e outro chuvoso. Nos três locais monitorados, a profundidade do nível do lençol freático respondeu de forma positiva em relação à precipitação. Houve correlação positiva mais forte entre precipitação e a profundidade do nível do lençol freático no ponto 1- Fluxo de Retorno ($R^2 = 0,91$ ao nível de 0,05% de significância) conforme se observa na Figura 52. Nos outros dois locais monitorados essa correlação também foi forte, contudo no ponto 3- Fluxo Difuso foi um pouco mais moderada quando comparada aos outros dois locais monitorados, como se verifica nas Figuras 53 e 54.

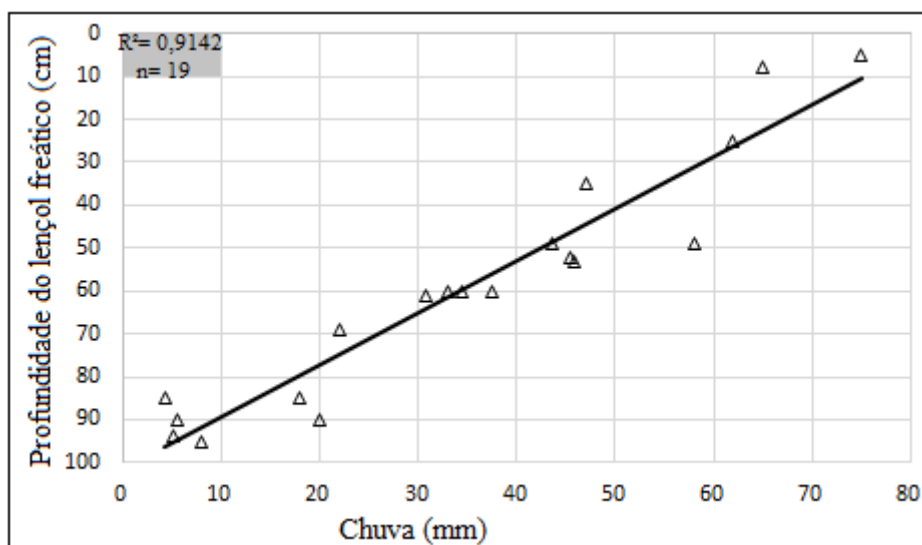


Figura 52- Correlação entre precipitação e a profundidade do nível do lençol freático no ponto 1- Fluxo de Retorno.
Organizado pela autora (2016).

As evidências sugerem que no ponto 1- Fluxo de Retorno, a profundidade do nível do lençol freático respondeu de forma mais direta em relação à precipitação. Contudo, essa diferença quando comparada ao ponto 2- Fluxo *Piping* é baixa (1,6%). Nos três primeiros eventos de chuva que ocorreram em abril/2015 e nos quatro últimos eventos que ocorreram em agosto/2015, foi observado o menor volume de chuva

acumulada nos eventos e, consequentemente, também a menor alteração do nível do lençol freático nos três pontos monitorados. Já nos meses de maio, junho e julho/2015 foram registrados os maiores volumes de chuva e, assim, as maiores elevações do nível do lençol freático. Esses três meses juntos representaram mais de 87% da profundidade do nível do lençol freático em toda a série analisada, ao passo que nos meses de abril e agosto responderam por pouco mais de 12% da série.

Em todos os eventos em que a profundidade do nível do lençol freático foi monitorada, observou-se que este respondeu de forma positiva em relação à precipitação, isto é, em cada evento de precipitação, a profundidade do nível do lençol freático aumentava de acordo com o volume e a intensidade da chuva, e quando a precipitação diminuía a profundidade do nível do lençol freático também abaixava. Entretanto, no ponto 1- Fluxo de Retorno, a resposta da profundidade do nível do lençol freático em relação à precipitação foi mais estável, quando comparado aos outros dois pontos, em que os menores índices pluviométricos (5,2 mm) representaram também os menores níveis do lençol freático (4 cm de altura) e os maiores volumes pluviométricos (75 mm), representando, assim, os mais altos níveis do lençol freático (95 cm de altura).

No ponto 2- Fluxo *Piping*, a profundidade do nível do lençol freático respondeu de forma mais moderada em relação à precipitação, ou seja, houve uma discrepância em relação aos 19 eventos monitorados. De forma semelhante ao ponto 1- Fluxo de Retorno e o ponto 2- Fluxo *Piping* também apresentaram equilíbrio entre o menor e maior volume de chuva e a profundidade do nível do lençol freático.

Apesar disso, quando se observa os demais eventos, nota-se uma alteração principalmente em três eventos excepcionais. Em um evento de 34,5 mm de chuva, a variação foi somente de 8 cm de altura do nível do lençol freático, em outro evento de 20 mm de chuva o nível do lençol freático aumentou somente 5 cm de altura e, por último, em um evento de 18 mm de chuva o nível do lençol freático foi de apenas 6 cm de altura (Figura 53).

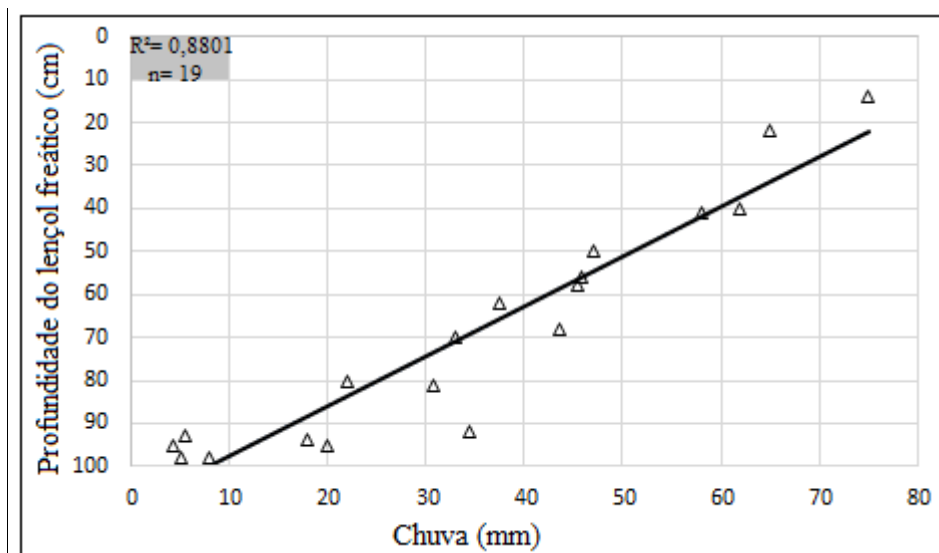


Figura 53- Correlação entre precipitação e a profundidade do nível do lençol freático no ponto 2- Fluxo *Piping*.
Organizado pela autora (2016).

Nessa situação, comparada aos demais eventos monitorados nesse mesmo ponto, (2- Fluxo *Piping*) a média de 34,7 mm de chuva, deveria ser suficiente para aumentar a profundidade do nível do lençol freático em média de até 31,1 cm de altura. Portanto, nota-se que nesse ponto 2- Fluxo *Piping*, embora responda de forma positiva em relação à precipitação, ocorreram eventos distintos em que altera a média a profundidade do nível do lençol freático dos eventos monitorados que foi de 31,2 cm de altura. Isso se deve ao fato, principalmente, desses três eventos excepcionais terem ocorrido em um período seco, em que a água da chuva teve mais facilidade de infiltração em função do solo estar menos úmido.

No ponto 3- Fluxo Difuso também ocorreu uma semelhança entre os menores e maiores volumes de chuva e a profundidade do nível do lençol freático, assim como ocorreu nos outros dois pontos monitorados citados anteriormente. Igualmente ao ponto 2- Fluxo *Piping*, no ponto 3- Fluxo Difuso foi observada uma alteração em dois eventos, em que a profundidade do nível do lençol freático não responderam de forma constante, em relação à precipitação. Em um evento foi registrado um total de 45,5 mm de chuva e 24 cm de profundidade do nível do lençol freático e em outro evento foi registrado 20 mm de chuva e somente 6 cm de profundidade do nível do lençol freático. Nesse caso, a média de 34,7 mm de chuva, deveria ser suficiente para aumentar a profundidade do nível do lençol freático em média de até 29,6 cm de altura (Figura 54).

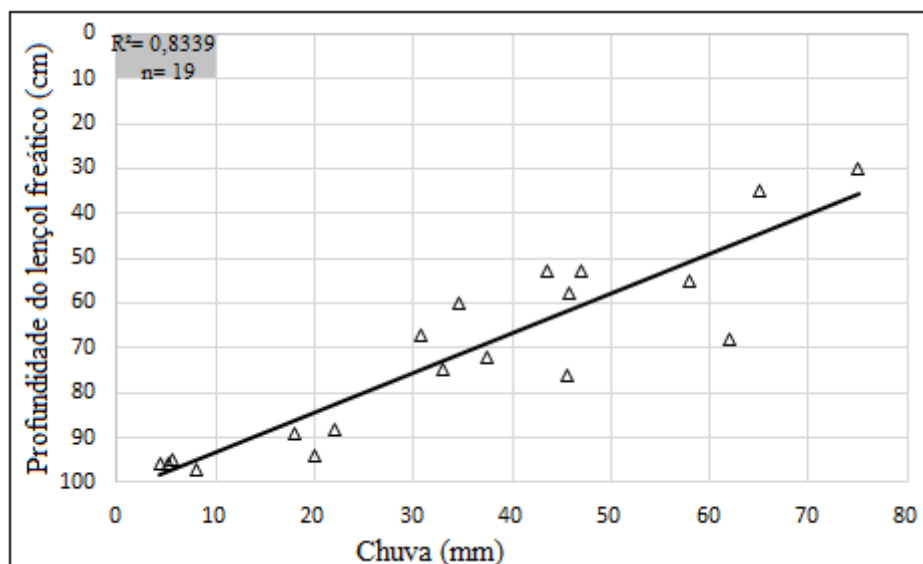


Figura 54- Correlação entre precipitação e a profundidade do nível do lençol freático no ponto 3- Fluxo Difuso.
Organizado pela autora (2016).

Portanto, quando comparados os volumes de chuva e a profundidade do nível do lençol freático dos três locais monitorados (ponto 1- Fluxo de Retorno ponto 2- Fluxo *Piping* e ponto 3- Fluxo Difuso) foi observada uma diferença significativa entre a altura do nível do lençol freático em cada ponto monitorado e a resposta desses em relação à precipitação. O destaque maior se refere ao ponto 1- Fluxo de Retorno, em que a correlação entre chuva e a profundidade do nível do lençol freático é mais forte em comparação aos outros dois locais monitorados. Entretanto, ambos os locais monitorados responderam de forma positiva em relação à precipitação.

Essa correlação entre a chuva, vazão máxima e a profundidade do nível do lençol freático permitiu observar que cada um dos três locais monitorados (ponto 1- Fluxo de Retorno, ponto 2- Fluxo *Piping* e ponto 3- Fluxo Difuso) se comporta ora de forma distinta entre um e outro e ora de forma semelhante. Destaca-se, porém, que a principal diferença entre cada um dos três pontos monitorados, apesar de terem semelhanças entre os dados analisados de chuva, vazão máxima e a profundidade do nível do lençol freático, é o conjunto dos processos atuantes e localização (setor da vertente), tendo como resultado final heterogeneidade em cada forma (ponto) monitorado.

5.6.2 Correlação entre precipitação e vazão máxima nos locais monitorados

A precipitação influenciou positivamente no aumento da vazão, com apenas uma diferença moderada entre os três pontos de monitoramento. No canal de 2ª ordem, localizado no interior da mata, essa correlação da chuva e vazão máxima foi forte ($R^2 = 0,91$ ao nível de 0,05% de significância) conforme é demonstrado na Figura 55, obtendo contribuição do fluxo subsuperficial interceptado pela estrada.

Quando comparados ao total mensal de chuva e vazão máxima no canal de 2ª ordem no período monitorado, à vazão máxima respondeu de forma estável em relação à chuva, ou seja, o menor volume de chuva (25,7 mm em out/14) foi também o menor volume de vazão máxima (55 L/s em out/14) e o maior volume de chuva (312,5 mm em jul/15) representou também o maior volume de vazão máxima (650 L/s em jul/15).

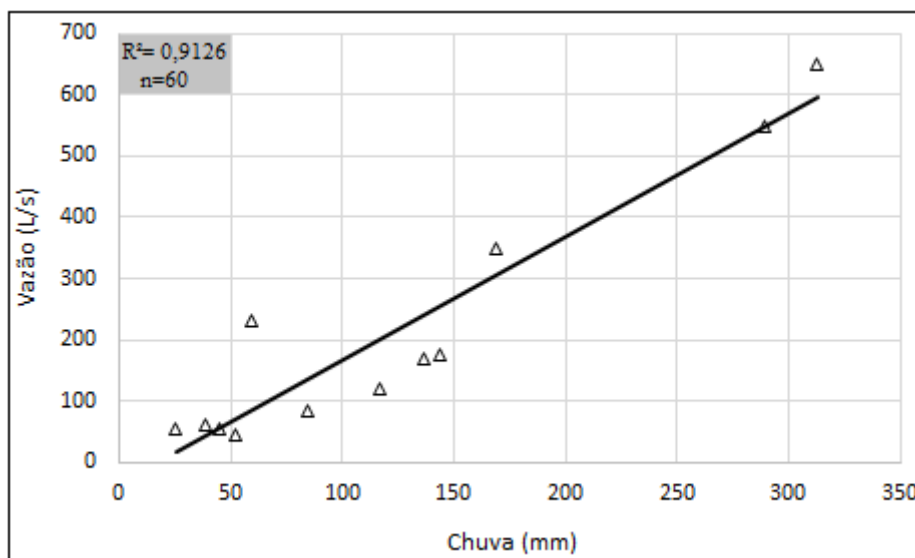


Figura 55- Mudança no processo chuva-vazão máxima, monitorado no canal de 2ª ordem na bacia do Rio Guabiroba.

Nota: $n=60$ representa a soma de vazão máxima dos 60 eventos monitorados em 12 meses.

Organizado pela autora (2016).

Em relação aos três pontos monitorados, foi observado que ambos apresentaram correlação forte entre chuva e vazão máxima, contudo, o fluxo interceptado no ponto 2- Fluxo *Piping* foi o que teve melhor correlação ($R^2 = 0,95$). Já em relação aos outros dois pontos monitorados (ponto 1- Fluxo de Retorno e ponto 3- Fluxo Difuso) a correlação positiva foi forte, entretanto mais moderada em resposta à precipitação quando comparados ao ponto 2- Fluxo *Piping* (Figuras 56, 57 e 58).

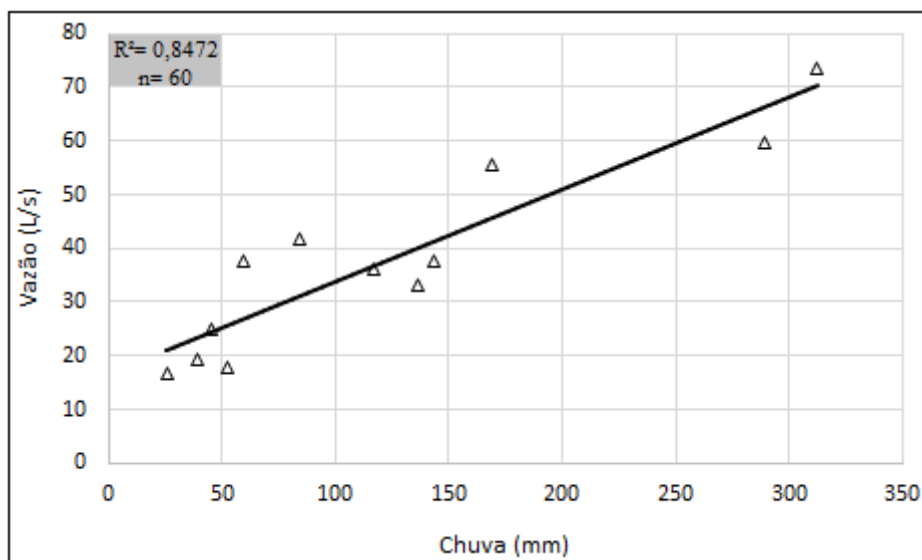


Figura 56- Mudança no processo chuva-vazão máxima, monitorado no ponto 1- Fluxo de Retorno na bacia do Rio Guabiroba.

Nota: $n=60$ representa a soma de vazão máxima dos 60 eventos monitorados em 12 meses.

Organizado pela autora (2016).

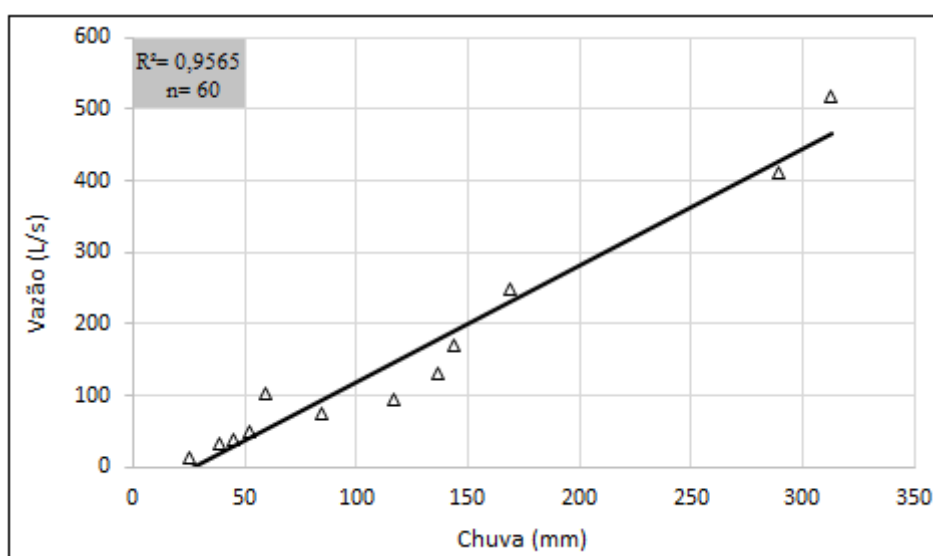


Figura 57- Mudança no processo chuva-vazão máxima, monitorado no ponto 2- Fluxo Piping na bacia do Rio Guabiroba.

Nota: $n=60$ representa a soma de vazão máxima dos 60 eventos monitorados em 12 meses.

Organizado pela autora (2016).

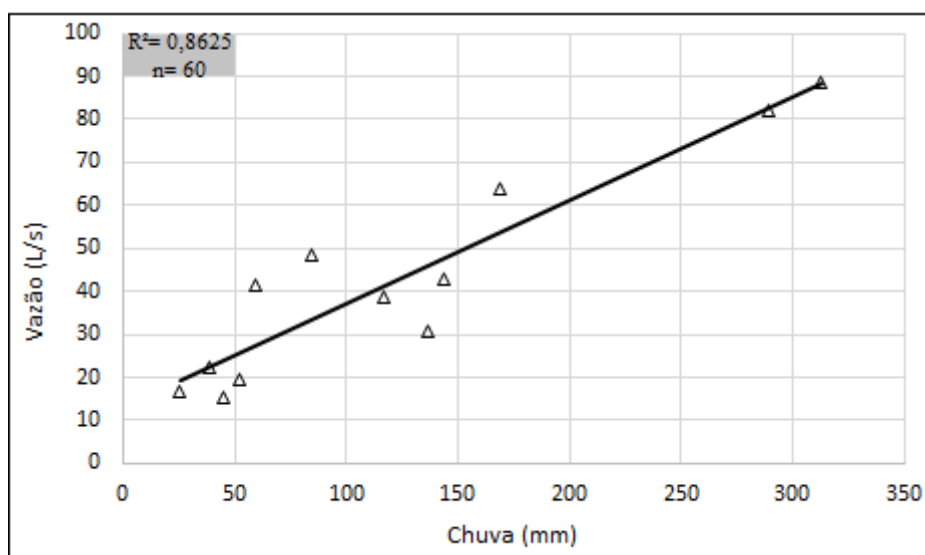


Figura 58- Mudança no processo chuva-vazão máxima, monitorado no ponto 3- Fluxo Difuso na bacia do Rio Guabiroba.

Nota: $n=60$ representa a soma de vazão máxima dos 60 eventos monitorados em 12 meses.

Organizado pela autora (2016).

Nos três pontos monitorados a resposta da vazão máxima em relação à chuva aconteceu de forma proporcional, isto é, os maiores volumes de chuva aconteceram em jul/15 e, conseqüentemente, nesse mesmo período ocorreu também a maior vazão registrada. O mesmo aconteceu com os menores volumes de chuva e vazão máxima registrada, ambos ocorridos em ago/15 (Tabela 14).

Tabela 14- Máxima e mínima de chuva e vazão no período monitorado

Pontos monitorados	Chuva máxima (mm)	Chuva mínima (mm)	Vazão média máxima (L/s)	Vazão média mínima (Ls)
1- Fluxo de Retorno	312,5	25,7	10,2	4,6
2- Fluxo <i>Piping</i>	312,5	25,7	73,4	3,2
3- Fluxo Difuso	312,5	25,7	13,1	4,5

Dados coletados e trabalhados pela autora (2015).

Como já mencionado, a correlação mais expressiva entre chuva e vazão máxima se deu no fluxo subsuperficial interceptado no ponto 2- Fluxo *Piping*. Entretanto, esse fluxo subsuperficial chama a atenção pelo fato de 30 eventos de vazão, estarem entre 10 e 40 L/s, representando, assim, 50% de vazão máxima no período analisado. A chuva, para gerar esse valor de vazão, variou entre 10 mm e 50 mm. Isso indicou que no local monitorado, não é necessário que a precipitação tivesse muito volume, e um valor em

torno de 40 mm com intensidade média de 5,8 mm/h, já foi suficiente para gerar fluxo subsuperficial próximo ou superior a 20 L/s.

No ponto 1- Fluxo de Retorno e o ponto 3- Fluxo Difuso foi necessário no mínimo 8 mm para gerar fluxo subsuperficial (vazão registrada), em média de 1,4 L/s e em torno de 60 mm foi suficiente para gerar fluxo subsuperficial de 16,6 L/s. Já o ponto 2- Fluxo *Piping* a pluviosidade em torno de 12 mm foi suficiente para gerar vazões máximas de 16,6 L/s, ou seja, o volume de chuva 5 vezes inferior do ponto 1- Fluxo de Retorno e o ponto 3- Fluxo Difuso foi suficiente para gerar a mesma quantidade de vazão no ponto 2- Fluxo *Piping*.

CAPÍTULO 6

DISCUSSÕES

6 DISCUSSÕES

6.1 Conexão vertente e rio por meio da interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas não pavimentadas

Na BRG a rede viária torna-se uma rede hidrográfica acessória nos eventos de chuva, contribuindo com a dissecação do solo. Dessa forma, aceleram de forma rápida a conexão da vertente e rio com a interceptação e o redirecionamento do fluxo subsuperficial, fazendo com que o fluxo interceptado chegue ao rio por meio de 58 cruzamentos de estradas e canal fluvial. Nesse caso, os processos de interceptação do fluxo subsuperficial são potencializados com cruzamentos de estradas e rios.

Na base cartográfica de 2002, a rede viária da BRG somava apenas 82,4 km (THOMAZ *et al.*, 2014). Entretanto, atualmente a BRG conta com um total de 130 km, ou seja, houve um acréscimo de 47,6 km, mais de 60% de estradas em 12 anos (3,96 km/ano), potencializando ainda mais os processos de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas.

Dos processos atuantes da interceptação do fluxo subsuperficial, nota-se que três formas se destacam mais, sendo classificados como: 1- Fluxo de Retorno, 2- Fluxo *Piping* e 3- Fluxo Difuso (Figura 20). A caracterização e, posteriormente, a classificação das formas de interceptação possibilita diferenciar os processos que prevalecem em cada setor da vertente.

Luce (2002) reforça que o clima exerce forte controle no fluxo subsuperficial, sugerindo que a interceptação deste pela estrada ocorre nos eventos mais severos de chuva. No entanto, Jones e Grant (1996) e Thomas e Megahan (1998) observaram que os aumentos de vazão na bacia hidrográfica ocorrem em eventos de chuva relativamente comuns, exigindo, neste caso, uma compreensão física de como o processo da interceptação do fluxo subsuperficial, causado pelos cortes da estrada, respondem em relação a vertente.

No caso da BRG, os três processos (formas) diferenciados de interceptação do fluxo subsuperficial se distinguem em setores da vertente. O processo 1- Fluxo de Retorno esteve presente principalmente em fundo de vale e áreas úmidas, ao passo que o processo 2- Fluxo *Piping* prevalece em média vertente e o processo 3- Fluxo Difuso ocorre com mais frequência nas áreas em alta vertente de forma exfiltrada paralelamente ao talude da estrada (Figura 22).

Corroborando com Jones e Grant (1996) e Thomas e Megahan (1998), os dados obtidos mostram que no ponto 2- Fluxo *Piping* volumes de chuva inferior a 83,3% são

suficientes para gerar a mesma quantidade de vazão máxima no ponto 1- Fluxo de Retorno e no ponto 3- Fluxo Difuso, isto é, a mesma quantidade de vazão máxima do fluxo subsuperficial registrada nos três pontos monitorados (Figura 57). No ponto 2- Fluxo *Piping* essa vazão máxima foi gerada com volumes de chuva muito inferior comparado aos outros dois locais monitorados, evidenciando-se, assim, uma diferença significativa em relação à quantidade de chuva necessária para gerar fluxo subsuperficial no ponto 2- Fluxo *Piping* comparado aos outros dois locais monitorados. Essa dinâmica diferenciada, nesse ponto monitorado, pode ser um indicativo da resposta em relação à forma de interceptação e a localização da vertente, facilitando a dissipação da água no local monitorado.

Dos 20 locais identificados com processos de interceptação do fluxo subsuperficial ocasionado por cortes das estradas não pavimentadas, foram monitorados 3 locais com formas distintas do processo (Figura 20). Constata-se, dessa forma, que no ponto 1- Fluxo de Retorno a camada saturada é formada pela chuva e pelo fluxo subsuperficial interceptado pela estrada, e serve como um reservatório de abastecimento em períodos de estiagem do canal de 2ª ordem localizado a margem esquerda da estrada (Figura 30). Já no ponto 2- Fluxo *Piping* a interceptação do fluxo subsuperficial resulta na formação de um canal intermitente no sentido longitudinal da estrada, gerando fluxos de água significativos para o canal receptor (Figura 33). No ponto 3- Fluxo Difuso o principal processo observado é que a água do fluxo subsuperficial interceptado é exfiltrada lateralmente no talude encaixado da estrada, formando também um canal intermitente no sentido longitudinal da estrada (Figura 34).

Os processos observados da interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas, evidenciam uma expressiva contribuição com a vazão nos canais fluviais receptores. Como consequência, observa-se também, que no local onde o fluxo subsuperficial foi desviado (redirecionado) a umidade da área a jusante do desvio diminuiu. Nessa situação, a estrada não pavimentada torna-se importante na dissecação do solo por meio da interceptação do fluxo subsuperficial. Thomaz *et al.*, (2014) e Cunha (2011) salientam que a drenagem lateral nas estradas de circulação principal (processo de retirada de água do leito das estradas) faz com que as águas cheguem rapidamente à rede de drenagem, aumentando o débito fluvial (aumento rápido de vazão).

A declividade e a forma do terreno variaram em relação aos três locais monitorados. No ponto 1- Fluxo de Retorno, a declividade predominante é inferior a 6%

e a forma do terreno é convergente-côncava, facilitando, assim, o redirecionamento do fluxo subsuperficial interceptado pela estrada para o fundo de vale (Tabela 5). De acordo com Luce (2002) nas áreas côncavas, as estradas não pavimentadas além de interceptar o fluxo subsuperficial, são potenciais também para manter a umidade do solo por um tempo relativamente maior.

No ponto 2- Fluxo *Piping* a declividade se situa 12 – 20% sob a forma do terreno divergente-retilínea, alterando significativamente a forma de dispersão do fluxo subsuperficial interceptado pela estrada, diminuindo a umidade do solo e a jusante da interceptação (Tabela 5). No ponto 3- Fluxo Difuso a declividade é >30% com Neossolos profundos, apresentando afloramento de rochas no local (Tabela 5). A forma do terreno é divergente-côncavo, o que facilita a dispersão da água do fluxo subsuperficial interceptado. Nesse caso, quando as estradas não pavimentadas estiverem presentes em setores declivosos recomenda-se que devem ser instalados dissipadores de energia para dissipar água interceptada a ser entregue nos rios (BAESSO e GONÇALVES, 2003).

O volume total do fluxo interceptado depende da distância do desvio pela estrada em relação ao divisor topográfico, o processo atuante (forma de interceptação), e principalmente o tempo de permanência do fluxo subsuperficial interceptado pela estrada. Consequentemente, uma vez desviado o fluxo subsuperficial interceptado por cortes das estradas, a umidade do solo e a jusante da vertente tende a diminuir.

Como as estradas não pavimentadas da BRG foram implantadas sem levar em consideração as características do terreno, se observa que nos pontos monitorados os processos de interceptação do fluxo subsuperficial se intensificaram nos lugares onde as estradas foram abandonadas ou com pouca frequência de uso. Nesse caso, associa-se também a ausência de sistema de drenagem para redirecionar o fluxo subsuperficial interceptado pela estrada, não evitando, assim, picos de vazão no rio nos eventos de chuva, tendo como consequência a desestabilização dos canais fluviais receptores.

6.2 Relação chuva, vazão máxima e a profundidade do nível do lençol freático nos locais de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas

Embora a classe de chuva de 10-19,9 mm represente 26,5% do número de eventos registrados, a classe superior a 50 mm inclui os eventos mais significativos em relação à contribuição do volume de chuva com um total de 891,2 mm (Tabela 9). A alta disponibilidade hídrica na bacia associada a leves eventos de chuva ou eventos

superiores a 50 mm como os ocorridos na BRG, acompanhada da interceptação do fluxo subsuperficial desempenham um papel importante nos processos de erosão mais graves e na contribuição total de vazão.

Faz necessário ressaltar que no ponto 2- Fluxo *Piping* o volume total de vazão é 61,6% superior quando comparado aos outros dois locais monitorados. Jones e Crane (1984) advertem que durante as chuvas, os *piping* são os responsáveis pela drenagem de cerca de 46% da água que alimenta os canais fluviais de algumas microbacias, e afirmam que eles constituem a maior fonte de água para os fluxos dos canais de 1ª ordem.

Estudos como os de Chappell *et al.*, (1998) e Bryan e Jones, (1997), sugerem que os *pipings* presentes em solos de regiões úmidas podem ter um significativo impacto sobre a geração de vazões. Quando interceptado por cortes da estrada, esse impacto sobre a paisagem pode ser ainda maior. Esse fato foi evidenciado na BRG, em que água interceptada pela estrada no ponto 2- Fluxo *Piping* escoava em velocidade, devido à ausência de dissipadores de energia e pela declividade acentuada. Por consequência, o fluxo subsuperficial interceptado por cortes da estrada, potencializa os picos de vazão nos canais receptores.

Em termos absolutos de contribuição do fluxo subsuperficial com a vazão no rio, foi possível monitorar somente o ponto 1- Fluxo de Retorno e o canal de 2ª ordem que está localizado à esquerda desse ponto monitorado, com a instalação de duas calhas próximas. O ponto 1- Fluxo de Retorno teve uma contribuição total de 7% de vazão máxima registrada em relação ao volume total de vazão máxima registrada no canal de 2ª ordem, ou seja, houve uma contribuição significativa com a vazão máxima total do rio, uma vez que leva-se em consideração somente um ponto de monitoramento em relação aos 20 locais identificados de interceptação do fluxo subsuperficial interceptado pelas estradas. Utilizando essa mesma lógica de contribuição da vazão máxima registrada com o canal fluvial, estima-se que no ponto 2- Fluxo *Piping* essa contribuição é em torno de 20% e no ponto 3- Fluxo Difuso seja de 7,7% de vazão máxima com o canal receptor.

Em relação a profundidade do nível do lençol freático nos três pontos de monitoramento, observa-se que este responde de forma positiva em relação às variações da precipitação, aumentando a profundidade do nível do lençol freático no período chuvoso e rebaixando a profundidade do nível do lençol freático no período seco (Figura 37). Contudo, o ponto 1- Fluxo de Retorno tem contribuição relativamente

superior em relação ao aumento da profundidade do nível do lençol freático no período de chuva (45,5%) quando comparado aos outros dois locais de monitoramento (ponto 2- Fluxo *Piping* e ponto 3- Fluxo Difuso). Essa contribuição mais significativa em termos de volume total da profundidade do nível do lençol freático no ponto 1- Fluxo de Retorno, é resultado do processo da saturação do solo e da exfiltração do fluxo subsuperficial interceptado pela estrada no local.

Nesse caso, evidencia-se uma camada saturada, em que a profundidade do nível do lençol freático diminui mais lentamente em relação aos outros dois locais monitorados, associado a forma do terreno convergente-côncava. Como consequência, ocorre saturação prolongada do solo, permanecendo em atividade entre uma precipitação e outra no período chuvoso, com rebaixamento de poucos centímetros da profundidade do nível do lençol freático no local, no período seco.

Nesse sentido, a crença de que o escoamento interno movimenta-se lentamente para produzir volumes de água e somente o escoamento superficial seria o principal componente do hidrograma da bacia, nem sempre é verdadeira. Existe também o amplo apoio da comunidade hidrológica sobre a verticalidade da infiltração, desde a superfície até o nível freático (HARTSOG *et al.*, 1997; FURNISS *et al.*, 1997; LUCE e WEMPLE, 2001; KOCHER *et al.*, 2002; CUNHA, 2011; SIDLE e ZIEGLER, 2012; WEMPLE, 2013; THOMAZ *et al.*, 2014).

Hewlett e Troendle (1975) melhoraram o entendimento referente à natureza anisotrópica do solo e postulam que o caminho vertical é um dos tantos prováveis. O fluxo subsuperficial responde também às mudanças nos gradientes hidráulicos e a maioria das vezes pode escoar paralelo à superfície, dependendo dos conteúdos de umidade, condutividades e gradientes topográficos.

Por sua vez, esse fluxo subsuperficial pode ser facilmente interceptado por cortes de estradas rurais. Essa interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas é um problema comum em muitos países (HARTSOG *et al.*, 1997; LUCE e WEMPLE, 2001; SUNITHA *et al.*, 2012). Sidle e Ziegler (2012), por exemplo, identificaram que no sudoeste da Ásia 78% da perda de solo tem uma relação direta com a partir da estrada, devido à sua proximidade com os canais fluviais e a interceptação do fluxo subsuperficial.

Nos três locais monitorados a precipitação influencia no aumento da vazão. Contudo, no ponto 2- Fluxo *Piping*, essa correlação é mais forte entre chuva e vazão máxima quando comparada aos outros dois locais monitorados, sendo mais forte até

mesmo que a relação entre chuva e vazão máxima no canal de 2ª ordem monitorado. No ponto 1- Fluxo de Retorno e ponto 3- Fluxo Difuso a correlação de chuva e vazão também foi forte, embora um pouco mais moderada em relação ao ponto 2- Fluxo *Piping*.

Kneale (1986) estudou a infiltração em amostras de 9 cm da camada superficial de solos franco argilosos com evidentes rachaduras. Para intensidades de chuva acima de infiltração média de $2,2 \text{ mm.h}^{-1}$, uma passagem rápida ligando diferentes camadas do perfil era evidente através das rachaduras, mas a absorção através das suas aberturas aumentava quando havia um crescimento na intensidade, de tal maneira que a relação entre entrada e saída era de 55% para uma intensidade de 22 mm.h^{-1} . Com esses valores, no verão, em Oxford, Inglaterra, o fluxo através de *pipings* fica entre 10 e 20% da precipitação.

Jones (1991) enfatiza que em uma bacia experimental (*Plynlimon*), do Instituto de Hidrologia da Inglaterra, quase a metade do fluxo que chega até os canais naturais passa através de um sistema de *piping*. Bonell *et al.*, (1984) constataram em um experimento que para um solo argiloso em Luxemburgo que o efeito do fluxo subsuperficial em macroporos interligados era tão rápido que não podia ser diferenciado do escoamento superficial. Na BRG, os solos presentes nesse ponto monitorado (ponto 2- Fluxo *Piping*) também tem uma textura muito argilosa, sendo superior a 60% de argila em profundidade de 40 – 60 cm. Isso pode ser um indicativo para a formação de dutos interligados no ponto monitorado.

Em outro estudo feito por Mendingo (1995), no Brasil, constatou-se que os diâmetros de *piping* encontrados nas sub-bacias do Arroio Turcato-RS, variaram entre 2 e 12 cm e o escoamento permaneceu vários dias após ocorrência de chuvas naturais. Dessa forma, as vazões observadas na saída de uma rede de *piping*, no período de março a agosto de 1996, variaram de 5,5 L/min a 12,4 L/min.

Quando se compara as medianas de vazão máxima nos três locais monitorados por meio do teste não paramétrico *Mann-Whitney*, fica constatado que estas são semelhantes entre o ponto 1- Fluxo de Retorno e o ponto 3- Fluxo Difuso (Tabela 14). No entanto, no ponto 2- Fluxo *Piping* as medianas são diferentes (heterogêneas) se comparadas aos outros dois locais monitorados. Evidencia-se, dessa forma, que a dinâmica da vazão e o processo de interceptação do fluxo subsuperficial no ponto 2- Fluxo *Piping* é diferente em comparação as outras duas formas monitoradas.

Sendo assim, os principais efeitos observados dos três pontos de interceptação do fluxo subsuperficial (ponto 1- Fluxo de Retorno, ponto 2- Fluxo *Piping* e ponto 3- Fluxo Difuso) causados por cortes das estradas não pavimentadas da BRG são:

- Importantes volumes de água tomam um sentido preferencial com relação ao sistema restante, produzindo um tempo de resposta bem menor que por meio da infiltração e deslocamento no subsolo;
- Vertente e rio são interconectados de forma rápida mudando a resposta hidrogeomorfológica natural da bacia ou da vertente;
- Existe semelhança no volume de vazão máxima interceptada no ponto 1- Fluxo de Retorno e ponto 3- Fluxo Difuso. Contudo, no ponto 2- Fluxo *Piping* se observa uma diferença significativa no volume de vazão máxima e nos mecanismos dos processos de interceptação em relação aos outros dois pontos monitorados;
- A profundidade do nível do lençol freático se assemelha entre o ponto 2- Fluxo *Piping* e o ponto 3- Fluxo Difuso se diferenciando exclusivamente no ponto 1- Fluxo de Retorno.

Como consequências ocorrem alterações nos processos naturais atuantes na vertente, em que as estradas não pavimentadas se tornam elementos eficazes na interceptação do fluxo subsuperficial, contribuindo, assim, de forma direta com a vazão do rio com o fluxo subsuperficial interceptado, desviado e redirecionado.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

7 CONCLUSÕES

As estradas não pavimentadas, existentes na BRG, se tornam uma rede hidrográfica acessória da rede de drenagem natural em eventos de chuva, aumentando significativamente a densidade de drenagem da bacia em 100%. Exerceram então, papel fundamental na conexão vertente e rio e na dissecação do solo, sendo então, eficientes na transmissão do fluxo subsuperficial que foi interceptado.

A localização em diferentes setores da vertente, condicionaram-nas em elementos lineares presentes nas paisagens rurais potenciais na interceptação do fluxo subsuperficial. A caracterização e, posteriormente, a classificação das formas distintas de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas foram absolutas em representar os diferentes mecanismos de processos decorrentes da interceptação.

As formas foram identificadas e na sequência classificadas como: 1- Fluxo de Retorno, 2- Fluxo *Piping* e 3- Fluxo Difuso. Essa classificação foi fundamental para analisar os processos (especificidades) agentes em cada forma, pois os processos (fluxos subsuperficiais interceptados) estão presente em setores distintos na vertente. O processo 1- Fluxo de Retorno foi encontrado principalmente em fundo de vale e em áreas úmidas, o processo 2- Fluxo *Piping* prevaleceu em média vertente com domínio de solos de textura argilosa e o processo 3- Fluxo Difuso esteve presente com mais frequência em alta vertente encaixado no talude da estrada.

Ao todo foram identificados 20 locais de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas na BRG. Porém, foi possível monitorar apenas três pontos (locais) desse processo. Cada um dos três locais monitorados apresentou mecanismos diferenciados no processo de interceptação. As características principais do ponto 1- Fluxo de Retorno é que a interceptação de fluxo subsuperficial ocorre em lençol freático raso ou áreas saturadas/fluxo de retorno próximo à rede de drenagem, em nível de base e pressão hidrostática. O ponto 2- Fluxo *Piping* possui um caminho preferencial único que favorece a passagem da água até ser interceptado por cortes da estrada. Enquanto o ponto 3- Fluxo Difuso é caracterizado por apresentar uma camada fina de água exfiltrada lateralmente no talude, exposto da estrada devido ao fluxo de água paralelo a vertente e somado a subida do lençol freático que aflora em função da ruptura hidrológica da vertente causada pelos cortes de estrada.

O monitoramento dos processos em cada um dos três pontos e os volumes de chuva, a profundidade do nível do lençol freático e vazão máxima permitiu verificar a influências que estas variáveis exerceram na dinâmica dos processos em vertentes. A

chuva mostrou-se bem distribuída nos três locais monitorados. Por meio desse monitoramento, nota-se que a vazão máxima e a profundidade do nível do lençol freático responderam de forma positiva em relação à precipitação nos três locais monitorados (ponto 1- Fluxo de Retorno, ponto 2- Fluxo *Piping* e ponto 3- Fluxo Difuso). Porém, a correlação mais expressiva de chuva e vazão máxima, refere-se ao ponto 2- Fluxo *Piping* e a correlação mais forte de chuva e a profundidade do nível do lençol freático ocorre no ponto 1- Fluxo de Retorno.

Em termos absolutos de volume de vazão máxima monitorada no ponto 2- Fluxo *Piping*, foi registrado os maiores volumes com mais de 60% de contribuição total nos três locais monitorados. Isso coincide com a literatura consultada, em que quase a metade ou mais do fluxo de água que chega até os canais fluviais em uma bacia hidrográfica passa uma rede de *piping*. No que se refere ao processo de infiltração e percolação da água no solo, nota-se que no ponto 1- Fluxo de Retorno, o fluxo subsuperficial permanece por mais tempo em relação aos outros dois locais monitorados.

Sendo assim, por meio das interpretações desses processos geradores em cada uma das três formas de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes das estradas não pavimentadas, pode-se incidir que estas observações nos levam a reforçar a ideia de que as conexões entre a vertente e canal fluvial são muito complexas e não se pode estabelecer uma relação simples entre eles. Nessa situação, nota-se que as estradas não pavimentadas da BRG respondem de forma direta em relação a vertente, e esta responde também de forma direta em relação à estrada não pavimentada.

A caracterização, classificação e o monitoramento das formas de interceptação do fluxo subsuperficial causado por cortes da estrada, auxiliam na compreensão dos processos em bacias hidrográficas que vão desde escala local até escala global. Assim, o inventário e a classificação proposta, nesse trabalho, podem ser repetidos (utilizados) como ferramenta de auxílio para identificação, reconhecimento e monitoramento de processos de interceptação do fluxo subsuperficial em bacias hidrográficas com as características semelhantes à área de estudo, ou mesmo adaptado para outras bacias hidrográficas. Portanto, o presente estudo atingiu os objetivos propostos, além de confirmar a hipótese de que os mecanismos diferenciados do funcionamento hidrológico de áreas interceptadas podem alterar a dinâmica natural da bacia hidrográfica, conectando de forma rápida vertente e rio.

8 REFERÊNCIAS

ATKINSON, C. Techniques for Measuring Subsurface Flow in Hillslopes. In: Kirkby, M. (Ed.) **Hillslope Hydrology**, New York: John Wiley & Sons, p.73-120, 1978.

BAESSO, D. P. GONÇALVES, F. L. R. **Estradas não pavimentadas: técnicas adequadas de manutenção**. Florianópolis: DER, 2003. 204 p.

BETSON, R. P. MARIUS, J. B. Source areas of storm runoff. **Water Resour.** V. 5, p. 574-582, 1969.

BONELL, M. HENDRIKS, M. IMESON, A. HAZELHOFF, L. The Generation of Storm Runoff in a Forested Clayey Drainage Basin in Luxembourg. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.71, p.53-77, 1984.

BRYAN, R. B. JONES, J. A. A. The significance of soil piping processes: inventory and prospect. Soil Erosion Laboratory, University of Toromo, Scarborough, Ont. M1C 1A4, Canada. **Geomorphology** v. 20 p. 209-218, 1997.

BUILDING RURAL ROADS / **BjørnJohannessen**. - Bangkok: ILO, ILO ASIST Asia Pacific, 466 p. 2008, ISBN: 9789221209775; 9789221209782

CHAPPELL, N. A. Soil pipe distribution and hydrological functioning within the humid tropics: a synthesis. Lancaster Environment Centre, Lancaster University, Lancaster LA1 4YQ, UK. **Hydrol. Process.** v. 24, p. 1567–1581, 2010.

CHAPPELL, N. A, FRANKS S. W. LARENUS J. Multi-scale permeability estimation for a tropical catchment. **Hydrological Processes** v. 12: p. 1507–1523, 1998.

CHORLEY, R. J. The hillslope hydrological cycle. In KIRKBY, M. J. (org) **Hillslope Hydrology**. Ditora John Wiley & Sons, New York, 1-42, 1978.

CROKE, J. MOCKLER, S. Gully initiation and road-to-stream linkage in a forested catchment, southeastern Australia. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, n. 2, p. 205-217, 2001.

CUNHA, M. C. **Avaliação da eficácia das caixas de contenção de sedimentos em estradas rurais não pavimentadas na Bacia do Rio das Pedras, Guarapuava, Paraná**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Estadual do Centro-Oeste. Guarapuava, Paraná, 132 p. 2011.

DER- **Departamento de Estradas de Rodagem**. Curitiba-PR, 2014.

DNIT- **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**, 2014.

DUNNE, T. Field Studies of Hillslope Flow Processes In: KIRKBY, M. (ed.) **Hillslope Hydrology**, New York: John Wiley e Sons, p.227-293, 1978.

DUNNE, T. Hydrology, mechanics, and geomorphic implications of erosion by subsurface flow. In: Higgins, C.G., Coates, D.R. (Eds.), *Groundwater Geomorphology, the Role of Subsurface Water in Earth-Surface Processes and Landforms*. **Geol. Soc. Am. Spec. Pap.** 252, p. 1-28, 1990.

DUNNE, T. BLACK, R. D. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. **Water Resour.** v. 6, p. 1296-1311, 1970.

DUNNE T. MOORE T. R. TAYLOR C. H. Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 20 n.3, p. 305–327, 1975.

EMBRAPA: **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 3 ed. Brasília, DF. 2013.

ESRI, ArcGIS 10.2, **Environmental Systems Research Institute**, 2013.

FAIZ A, FAIZ A, WANG W, BENNETT C. Sustainable rural roads for livelihoods and livability. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* v. 53, p. 1–8. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.09.854, 2012.

FU, B. NEWHAM, L. T. H. RAMOS-SCHARRÓN, C. E. A. A review of surface erosion and sediment delivery models for unsealed roads. **Environmental Modelling e Software** v. 25, p. 1-14, 2010.

FURNISS, M. J. LOVE, M. FLANAGAN, S. A. **Diversion Potential at Road-Stream Crossings**. United States Department of Agriculture Forest Service Technology e Development Program, 1997.

GOVERS, G. Spatial and Temporal Variability in Rill Development Processes at the Huldemberg Experimental Site. **Catena Suppl.** Braunschweig, n.8, p.17-34, 1987.

GRIEBELER, N.P. **Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas**. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, 2002.

GUIMARÃES, C. J. DROPA, M. M. JORGE, M. A. P. **Dos caminhos de circulação às rodovias de integração**. Ponta Grossa-PR, 2004.

HARTSOG, W. KAHKLEN, K. MOLL, J. SWANSTON, D. N. **A Monitoring System for Measuring Effects of Roads on Groundwater: Equipment and Installation**. United States Department of Agriculture Forest Service Technology e Development Program, 1997.

HEWLETT, J. TROENDLE, C. Non-Point and Diffused Water Sources: A Variable Source Area Problem, In: **Symposium on Watershed Management**, New York: Am. Soc. Civ. Eng. Proceedings, p. 65-83, 1975.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geol Soc. Am. Bull.** v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

IMENSON, A. L. Geomorphological processes, soil structure and ecology. In: PITTY, A. **Themes on Geomorphology**. London: Croomhelm, 1985.

INCONTROL S/A, **Manual de operação e instalação**: calha parshall medidor de vazão em canais abertos. Cód: 073AA-025-122M – Rev. B, Novembro / 2008.

JAIROSI, I, Y. **Digital Biodiversity Data Standards e Guidelines**. Southern African Biodiversity Support Programme, 2001.

JONES, A. A. **The Nature of Soil Piping, a Review of Research**. Geobooks, Norwich, 301 p, 1981.

JONES, A. A. Soil Piping and Stream Channel Initiation, **Water Resources Research**, v. 7, n. 3, p. 602-610, 1991.

JONES, A. A. CRANE, F. G. Pipeflow and pipe erosion in the Maesnant experimental catchment. In: T. P. Burt and D. E. Walling (ed). **Catchment Experiments in Fluvial Geomorphology**. GeoBooks, p. 55-72, 1984.

JONES, A. A. GRANT, G. E. Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. **Water Resources Research** v. 32, p. 959–974, 1996.

KAHKLEN, K. MOLL, J. SWANSTON, D. N. **Measuring Effects of Roads on Groundwater: Five Case Studies**. United States Department of Agriculture Forest Service Technology e Development Program, 1999.

KIRKBY, M. J. CHORLEY, R. Throughflow, overland flow and erosion. Bull. Int. Assoc. **Sci. Hydrol.** v. 12, n. 3, p. 5-21, 1967.

KIRKBY, M. J. Hillslope runoff process and models. **Journal of Hydrology**. v. 100, p. 315–339, 1988.

KNEALE, W. The Hydrology of a Sloping, Strutured Clay Soil at Wytham, Near Oxford, England, Amsterdam, **Journal of Hydrology**, v. 85, p. 1-14, 1996.

KOCHER, S. D. GERSTEIN, J. M. HARRIS, R. R. **Rural Roads. A Construction and Maintenance Guide for California Landowners**, Berkeley, University of California, 2002.

LIN, H. S. BOUMA, J. PACHEPSKY, Y. WESTERN, A. THOMPSON, J. VAN, G. VOGEL, H. LILLY, A. Hydopedology: synergistic integration of pedology and hydrology. **Water Resources Research**, v. 42, n. 05301, 2006.

LIN, H. S. BROOKS, E. McDANIEL, P. BOLL, J. Hydropedology and Surface/Subsurface Runoff Processes. **Encyclopedia of Hydrological Sciences**, John Wiley & Sons, 2008.

LUCE, C. H. Hydrological processes and pathways affected by forest roads: what do we still need to learn? Rocky Mountain Research Station, Boise Aquatic Sciences Laboratory, 316 E. Myrtle, Boise, ID 83702, USA **Hydrol. Process.** v. 16, 2901–2904, 2002.

LUCE, C. H. WEPLE, B. C. Introduction to special issue on hydrologic and geomorphic of forest roads. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, p. 111–113, 2001.

McDONNELL J. J. **Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall**, 2003.

MEGAHAN W F. Subsurface flow interception by a logging road in mountains of central Idaho. In **Proceedings, National Symposium on Watersheds in Transition**. American Water Resources Association: Fort Collins, CO; 350–356, 1972.

MENDIONDO, E. **Integração das Escalas Hidrológicas nas Sub-Bacias Embutidas do Rio Potiribú, RS**. Dissertação (Mestrado Em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), UFRGS. Porto Alegre: IPH, 1995.

MENDIONDO E. D. TUCCI, C. E. M. Escalas hidrológicas II: diversidade de processos na bacia vertente. São Carlos, SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, ABRH, v. 2, n. 1, p. 59–122, 1997.

MINUZZI, R. B. SEDIYAMA, G. C. Influência da topografia na precipitação: uma análise estatística e via imagens de satélite. **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Fortaleza, 2004.

ODA, S. FERNANDES JÚNIOR, J. F. SÓRIA, M. H. A. **Implantação, localização e manutenção de estradas**. Departamento de transporte-EESC-USP, Universidade de São Paulo, 2007.

SIDLE, R. C. ZIEGLER, A. D. The dilemma of mountain roads. **Nature Geoscience**, vol. 5, july, 2012 |www.nature.com/naturegeoscience.

SIDLE, R. C. GHESTEM, M. STOKES, A. Epic landslide erosion from mountain roads in yunnan, China-challenges for sustainable development. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 14, p. 3093–3104, 2014. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/14/3093/2014.

SUNITHA, V. VEERARAGAVAN, A. KARTHIK, K. S. MATHEW, S. **Cluster-based pavement deterioration models for low-volume rural roads**. International Scholarly Research Network ISRN Civil Engineering Volume Article ID 565948, 2012.

THOMAS, R. B. MEGAHAN, W. F. Peak flow responses to clearcutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon: a second opinion. **Water Resources Research** v. 34, p. 3393–3403, 1998.

THOMAZ, E. L. **Processos hidrogeomorfológicos e o uso da terra em ambiente subtropical – Guarapuava-PR.** São Paulo: USP, 2005. 319p. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade de São Paulo-USP, São Paulo, 2005.

THOMAZ, E. L. VESTENA, L. R. **Aspectos Climáticos de Guarapuava-PR.** Guarapuava: UNICENTRO, 2003.

THOMAZ, E. L. VESTENA, L. R. RAMOS-SCHARRÓN, C. E. The effects of unpaved roads on suspended sediment concentration at varying spatial scales - a case study from Southern Brazil. **WEJ (Hertford)**, v. 28, p. 547-555, 2014.

TOPODATA: Guia para Utilização de Dados Geomorfométricos Locais. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>. Acesso em: 21/04/2014.

VILLELA, S. M. MATTOS, A. **Hidrologia aplicada.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.

WALDYKOWSKI, P. KRZEMIENÍ, K. The role of road and footpath networks in shaping the relief of middle mountains on the example of the Gorce Mountains (Poland). Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany. **Zeitschrift für Geomorphologie** v. 57, n. 4 p. 429–470, 2013.

WELC, A. Transportation of suspended matter in the Rivers Ropa and Bystrzanka and magnitude of wash down during the flood in July 1970. **Studia Geomorph. Carpatho-Balcan.** V. 6, p. 206–209, 1972.

WEMPLE B. C. **Investigations of runoff and sediment production from forest roads in western Oregon.** PhD dissertation, Oregon State University, Corvallis, OR, 1998.

WEMPLE, B. C. Assessing the Effects of Unpaved Roads on Lake Champlain Water Quality. Lake Champlain Basin Program. **Technical report** nº. 74, 2013.

WEMPLE, B. C. JONES, A. A. Runoff production on forest roads in a steep, mountain catchment. **Water Resources Research.** v. 39, n. 8, p. 1-17, 2003.

WEYMAN, D. Throughflow on Hillslopes and Its Relation to the Stream Hydrograph, **Bull.of International Association of Scientific Hydrology**, Wallingford, v. 2, p. 25-33, 1970.

WHIPKEY, R. Z. Subsurface stormflow from forested slopes. **Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.** v. 10, p. 74-85, 1965.

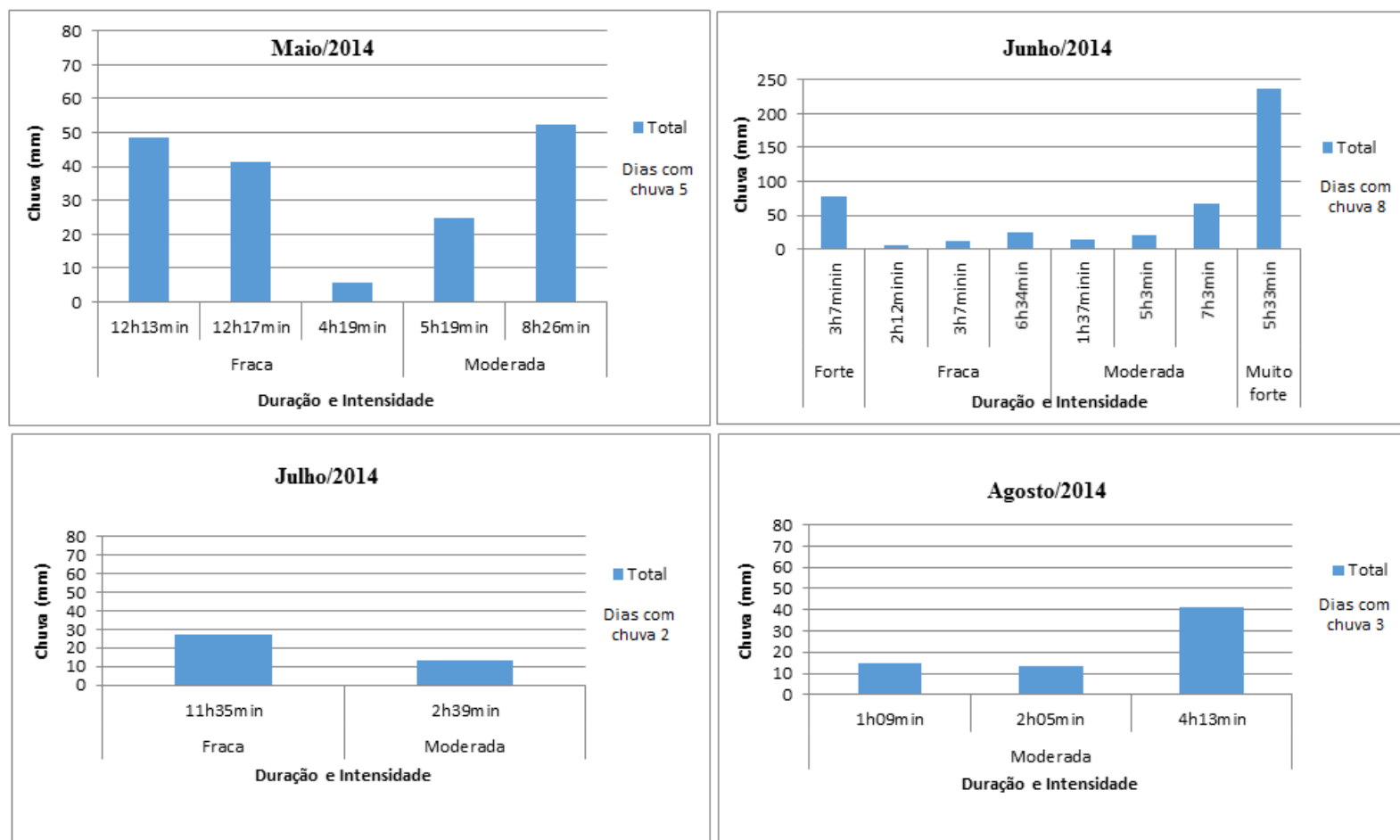
ZIEGLER, A. D. GIAMBELLUCA, W. T. SUTHERLAND, R. A. NULLET, M. A. YARNASARN, S. PINTHONG, J. PREECHAPANYA, P. JAIAREE, S. Toward understanding the cumulative impacts of roads in upland agricultural watersheds of northern Thailand. Geography Department, National University Singapore. Singapore **Agriculture, Ecosystems and Environment** v. 104, p. 145–158, 2004.

ZIEGLER, A. D. SIDLE, R. C. SONG, M. S. ANG, Z. J. DUANGNAMON, D.
Towards better design and management of tsunami evacuation routes: a case study of ao
Jak Beach Road. **Geol. Soc. London Special Publ.** London, UK, 2012.

APÊNDICES

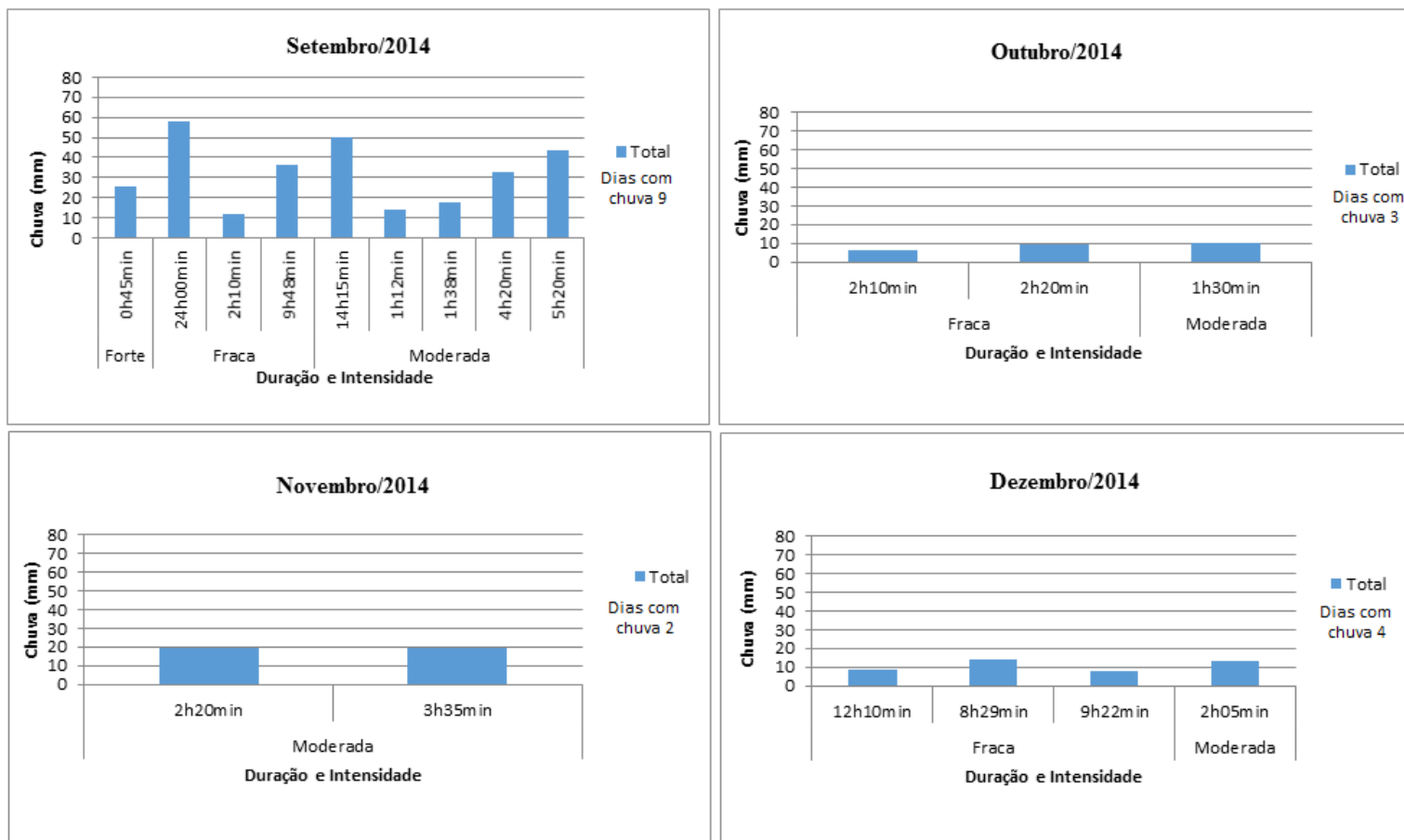
Inventário e Planilha de Levantamento de Campo	
Bacia Hidrográfica:	
Estrada:	
Data do levantamento de campo:	Condições Climáticas:
Avaliador:	Atividade:
Extensão total da estrada:	Extensão do ponto 1 ao ponto 2:
Extensão total da estrada:	Extensão do ponto 2 ao ponto 3:
Drenagem na estrada S () N ()	Largura da faixa de rolamento:
Desenho dos pontos observados:	Características de cada ponto observado: Ponto 1) Ponto 2) Ponto 3)
Coordenada de localização Ponto 1	
Coordenada de localização Ponto 2	
Coordenada de localização Ponto 3	
Nomeação preliminar do Ponto 1	
Nomeação preliminar do Ponto 2	
Nomeação preliminar do Ponto 3	

Apêndice 1- Planilha de auxílio de levantamento de campo para identificação dos locais de interceptação do fluxo subsuperficial por estradas não pavimentadas. Nota: O observador pode complementar o número de pontos observados quantas vezes forem necessárias. Organizado pela autora (2013).



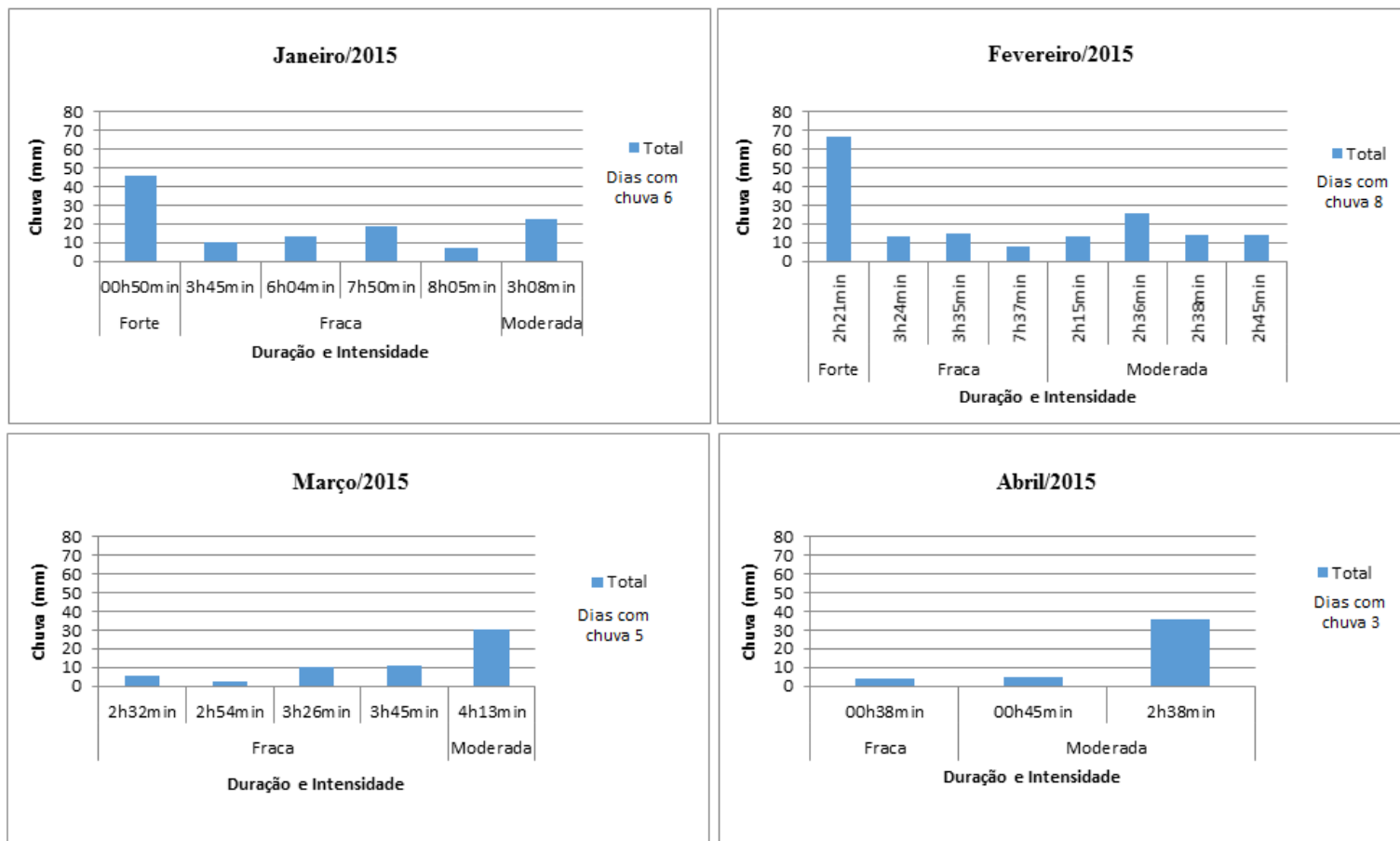
Apêndice 2- Total médio mensal de chuva registrada nos três pluviógrafos (duração, frequência e intensidade). Obs. Todos os eixos foram mantidos com máximo de 80 mm para facilitar a interpretação dos dados, a única exceção foi o mês de junho/2014 por se tratar de eventos mais fortes.

Organizado pela autora (2015).



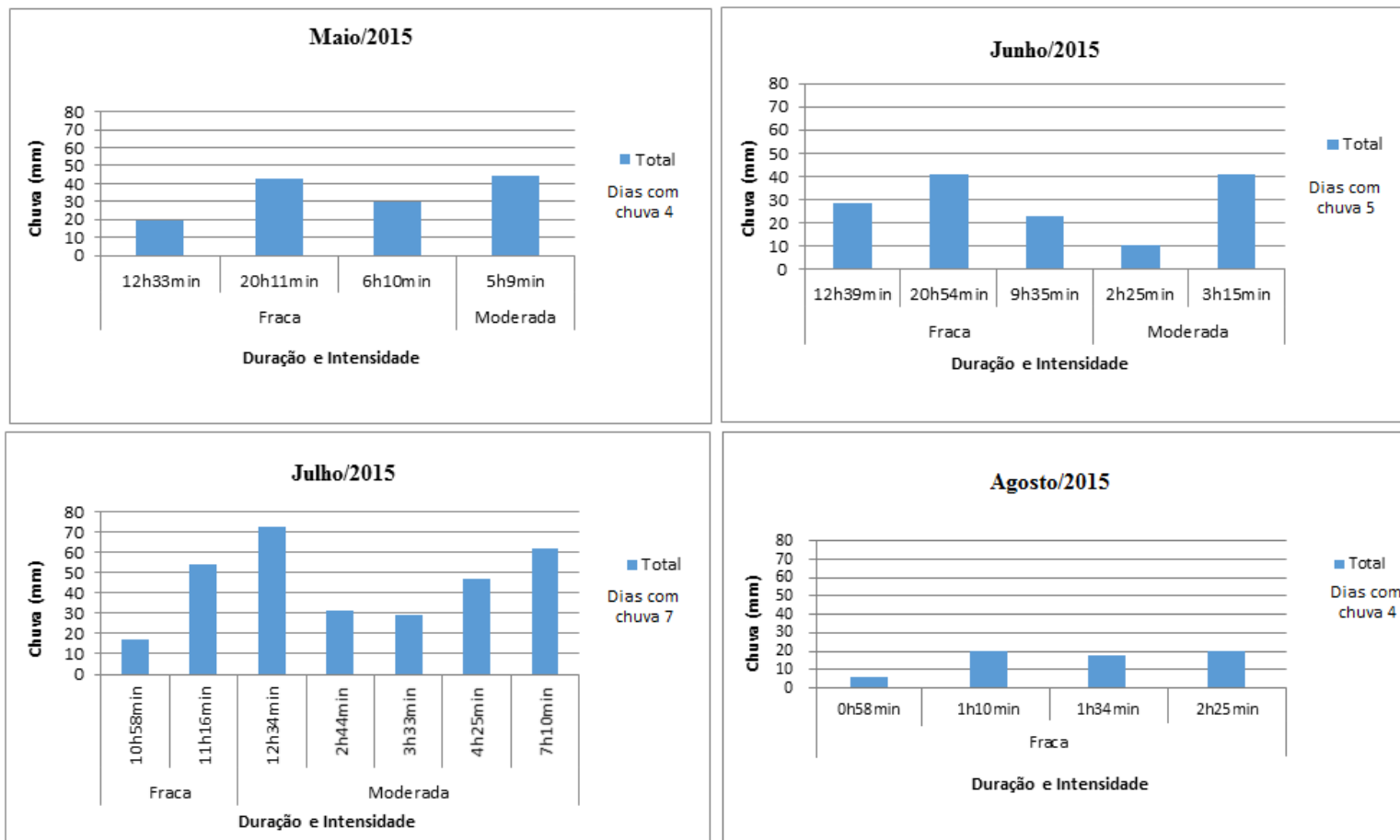
Apêndice 3- Total médio mensal de chuva registrada nos três pluviógrafos (duração, frequência e intensidade). Obs. Todos os eixos foram mantidos com máximo de 80 mm para facilitar a interpretação dos dados, a única exceção foi o mês de junho/2014 por se tratar de eventos mais fortes.

Organizado pela autora (2015)



Apêndice 4- Total médio mensal de chuva registrada nos três pluviômetros (duração, frequência e intensidade). Obs. Todos os eixos foram mantidos com máximo de 80 mm para facilitar a interpretação dos dados, a única exceção foi o mês de junho/2014 por se tratar de eventos mais fortes.

Organizado pela autora (2015).



Apêndice 5- Total médio mensal de chuva registrada nos três pluviômetros (duração, frequência e intensidade). Obs. Todos os eixos foram mantidos com máximo de 80 mm para facilitar a interpretação dos dados, a única exceção foi o mês de junho/2014 por se tratar de eventos mais fortes.

Organizado pela autora (2015).